

05 0618 us

06561 us #4

日 本 国 特 許 庁

PATENT OFFICE
JAPANESE GOVERNMENT



別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載さ
いる事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed
with this Office.

出 願 年 月 日

Date of Application:

2000年 5月30日

出 願 番 号

Application Number:

特願2000-160897

出 願 人

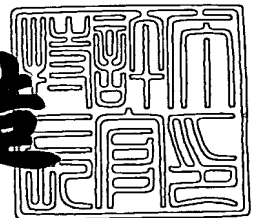
Applicant (s):

株式会社ニコン

2001年 2月 9日

特許庁長官
Commissioner,
Patent Office

及 川 耕 造



出証番号 出証特2001-3005066

【書類名】 特許願

【整理番号】 J82326A1

【提出日】 平成12年 5月30日

【あて先】 特許庁長官 殿

【国際特許分類】 H01L 21/027

【発明の名称】 投影光学系、当該投影光学系を備えた露光装置、及び当該露光装置を用いたマイクロデバイスの製造方法

【請求項の数】 19

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン
内

【氏名】 大村 泰弘

【特許出願人】

【識別番号】 000004112

【氏名又は名称】 株式会社ニコン

【代理人】

【識別番号】 100064908

【弁理士】

【氏名又は名称】 志賀 正武

【選任した代理人】

【識別番号】 100108578

【弁理士】

【氏名又は名称】 高橋 詔男

【選任した代理人】

【識別番号】 100089037

【弁理士】

【氏名又は名称】 渡邊 隆

【選任した代理人】

【識別番号】 100101465

【弁理士】

【氏名又は名称】 青山 正和

【選任した代理人】

【識別番号】 100107836

【弁理士】

【氏名又は名称】 西 和哉

【選任した代理人】

【識別番号】 100108453

【弁理士】

【氏名又は名称】 村山 靖彦

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 008707

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9800076

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 投影光学系、当該投影光学系を備えた露光装置、及び当該露光装置を用いたマイクロデバイスの製造方法

【特許請求の範囲】

【請求項1】 第1面の像を第2面に結像する投影光学系において、
前記第1面と前記第2面との間の光路に配置された第1の回折光学素子と、
前記第1の回折光学素子よりも前記第2面側の光路に配置された第2の回折光学素子と、

前記第1の回折光学素子と前記第2の回折光学素子との間の光路に配置された負のパワーを有する光学系と

を具備することを特徴とする投影光学系。

【請求項2】 前記第1面と前記第1の回折光学素子との間に配置された前方光学系と、

前記第2の回折光学素子と前記第2面との間の光路に配置された後方光学系とを更に具備し、

前記前方光学系は、前記第1面での軸上光束をほぼ平行光束に変換して、該平行光束を前記第1の回折光学素子へ導き、

前記負のパワーを有する光学系は、前記第1の回折光学素子を介した前記第1面での軸上光束を再びほぼ平行光束に変換して、該平行光束を前記第2の回折光学素子へ導くことを特徴とする請求項1記載の投影光学系。

【請求項3】 第1面の像を第2面に結像する投影光学系において、
前記第1面と前記第2面との間の光路に配置された回折光学素子と、
前記第1面と前記回折光学素子との間の光路に配置された光学系とを含み、
前記投影光学系の前記第2面側の開口数をNA、前記第1面から前記回折光学素子の直前までの前記光学系の結像倍率を β 、所定波長に対する前記回折光学素子の焦点距離をf、前記第1面から前記第2面に至る距離をLとすると、以下の条件を満足することを特徴とする投影光学系。

$$1 / |NA \cdot \beta| < 0.7$$

$$0.38 < f / L < 1.2$$

【請求項 4】 第 1 面の像を第 2 面に結像するために、前記第 1 面と前記第 2 面との間の光路に沿って配置された複数の光学素子を有する投影光学系において、

一方の面に形成された回折パターン面と、他方の面に形成された補正面とを有する回折光学素子を前記光路に沿って少なくとも 1 つ配置し、

前記補正面は、前記回折パターン面の製造誤差を補正することを特徴とする投影光学系。

【請求項 5】 前記補正面は、所定の基準面に対して $0.5\ \mu\text{m}$ 以下のサゲ量で非球面加工が施された微少非球面を有することを特徴とする請求項 4 記載の投影光学系。

【請求項 6】 前記基準面は、平面又は球面であることを特徴とする請求項 5 記載の投影光学系。

【請求項 7】 前記回折光学素子の回折パターンは、全て平面基板に形成されることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 6 の何れかに記載の投影光学系。

【請求項 8】 前記回折光学素子の回折パターンは光軸を中心とする複数の輪帯領域に形成され、前記各輪帯領域は複数の平面により複数の段で近似されるバイナリーオプティクス素子で形成され、前記各輪帯領域に形成されるバイナリーオプティクス素子は正のパワーをそれぞれ有することを特徴とする請求項 1 乃至請求項 7 の何れかに記載の投影光学系。

【請求項 9】 前記各輪帯領域にそれぞれ形成されるバイナリーオプティクス素子の少なくとも 1 つの段数は、異なることを特徴とする請求項 8 記載の投影光学系。

【請求項 10】 前記各輪帯領域に応じて透過率が異なるフィルターを、前記回折光学素子の近傍に配置したことを特徴とする請求項 8 又は請求項 9 記載の投影光学系。

【請求項 11】 前記回折光学素子の回折パターンは光軸を中心とする複数の輪帯領域に形成され、前記各輪帯領域の各々は正のパワーを持つ鋸歯状の断面形状を有することを特徴とする請求項 1 乃至請求項 7 の何れかに記載の投影光学系。

【請求項 1 2】 前記回折光学素子の回折パターンは互いに光軸を中心とする第 1 輪帯領域と第 2 輪帯領域に形成され、

前記第 1 輪帯領域は、前記第 2 輪帯領域よりも光軸側に形成されると共に、1 次又は -1 次回折光に関して回折効率が最も高くなる鋸歯状の断面形状を有し、

前記第 2 輪帯領域は、前記第 1 輪帯領域よりも周辺側に形成されると共に、 m 次又は $-m$ 次回折光 (m は 2 以上の整数) に関して回折効率が最も高くなる鋸歯状の断面形状を有することを特徴とする請求項 1 1 記載の投影光学系。

【請求項 1 3】 前記投影光学系を構成する前記複数の光学素子は、前記第 1 面の像を前記第 2 面に結像することに寄与するレンズを有し、前記投影光学系を構成する全てのレンズは、蛍石で構成されることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 7 の何れかに記載の投影光学系。

【請求項 1 4】 前記負のパワーを有する光学系は、非球面を有することを特徴とする請求項 1 乃至請求項 1 3 の何れかに記載の投影光学系。

【請求項 1 5】 第 1 面の像を第 2 面に結像するために、前記第 1 面と前記第 2 面との間の光路に沿って複数の光学素子をそれぞれ配置し、

前記複数の光学素子の少なくとも 1 つは、一方の面に形成された光学面と他方の面に形成された補正面とを有し、

前記補正面は、前記光学面の製造誤差を補正することを特徴とする投影光学系。

【請求項 1 6】 前記補正面は、所定の基準面に対して $0.5 \mu\text{m}$ 以下のサグ量で非球面加工が施された微少非球面を有することを特徴とする請求項 1 5 記載の投影光学系。

【請求項 1 7】 前記回折光学素子と前記第 2 面との間の光路に正のパワーを有する光学系を配置し、

前記第 1 面と前記回折光学素子との間の光路に配置された前記光学系は正のパワーを有することを特徴とする請求項 3 記載の投影光学系。

【請求項 1 8】 所定のパターンが形成されたマスクを前記第 1 面に設定するマスクステージと、

感光性基板を前記第 2 面に設定する基板ステージと、

前記第 1 面に設定された前記マスクを照明する照明光学系と、
前記マスクのパターン像を前記感光性基板に投影露光する請求項 1 乃至請求項 1 7 の何れかに記載の投影光学系と、
を具備することを特徴とする露光装置。

【請求項 1 9】 所定のパターンを有するマスクを前記第 1 面に設定する第 1 設定工程と、

感光性基板を前記第 2 面に設定する第 2 設定工程と、

前記マスクを照明する照明工程と、

請求項 1 乃至請求項 1 7 の何れかに記載の投影光学系を用いて前記マスクのパターン像を前記感光性基板に投影露光する露光工程と、

転写された前記感光性基板を現像する現像工程と、

を含むことを特徴とするマイクロデバイスの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0 0 0 1】

【発明の属する技術分野】

本発明は、第 1 面の像を第 2 面に結像するための投影光学系、この投影光学系を備え、半導体素子又は液晶表示素子等のデバイス又はマイクロデバイスを製造するためのリソグラフィ工程中でマスクパターンを基板上に転写する際に使用される露光装置、及びこの露光装置を用いて半導体素子、撮像素子、液晶表示素子、薄膜磁気ヘッド等のマイクロデバイスを製造するマイクロデバイスの製造方法に関する。

【0 0 0 2】

【従来の技術】

半導体素子等のマイクロデバイスを製造する際には、マスクとしてのレチクルに形成された微細なパターンの像を投影光学系を介して、レジストが塗布されたウェハ（又はガラスプレート等）上に転写する一括露光型（ステッパー等）、又はステップ・アンド・スキャン方式のような走査露光型の投影露光装置が使用されている。ウェハ等に微細なパターンを形成するためには、レチクルに照明光を照射して得られるレチクルのパターンの像の解像度を上げる必要がある。

【0003】

パターンの像の解像度を高める方法としては、主に光源から出射される照明光を短波長化する方法と投影光学系の開口数（N. A.）を高く設計する方法とがある。しかしながら、投影光学系の開口数を必要以上に高めたとしても長波長の照明光を用いた場合には解像度の向上に自ずと限界があるため、根本的に照明光の波長を短波長化する必要がある。従来、照明光の波長はg線（436nm）又はi線（365nm）がよく用いられていたが、現在では照明光の波長が更に短波長化してKrFエキシマレーザから出射されるレーザ光（248nm）又はArFエキシマレーザから出射されるレーザ光（193nm）が用いられるようになってきている。そして、これらの短波長の露光光のもとで使用できる投影光学系の開発が進められている。

【0004】

投影光学系の性能を評価する上で、高い解像度が得られる指標となる開口数が高いことは重要であるが、開口数が高くても収差が生じていたのでは微細なパターンを形成する上で問題を生ずる。ここで、収差の一例として色収差について考えてみると、微細なパターンを形成する用途に用いられる投影光学系の光学性能は極めて高いため、各収差をほぼ無収差にすることが必要となる。従来は、色収差を無収差とするために、投影光学系をレンズ群のみで構成される屈折光学系で実現していたために多数のレンズが必要となり、透過率の低減を招いたり投影光学系を製造するためのコストが高くなることは避けられなかった。また、像面の湾曲収差を0とするための条件は、一般的に知られているようにペッツバールの条件を満足させなければならないが、この条件を満足させるためには正のパワーを有するレンズ以外に負のレンズを有するレンズを組み合わせなければならず、透過率の向上及びコスト低減を図る上で好ましくない状況であった。

【0005】

ところで、レンズ等の屈折光学素子に対して回折光学素子は、色収差の出方が通常の屈折光学素子とは逆方向であるため、屈折光学素子と回折光学素子とを単に組み合わせるだけで色収差を補正することができる。また、回折光学素子はパワーを所定の値に設定することができるがペッツバール条件へ何ら寄与しないた

め、屈折光学素子の増加を招くことなく湾曲収差を0として像面を平坦にすることが可能となる。また、回折光学素子は回折角を任意に設定することができるため、非球面レンズと同様の作用を有する光学素子として作成することができるという利点もある。

【0006】

このように、回折光学素子を用いることで、屈折光学レンズの増加を招くことなく色収差の補正及び湾曲数差を0とすることができるため、投影光学系の透過率の向上及び低コスト化を図る上で極めて好適である。このような回折光学素子と屈折レンズとを組み合わせた光学系を、半導体製造装置用の投影光学系に採用した技術が、例えば特開4-214516号、特開平6-331941号、特開平7-128590号、特開平8-17719号、特開平1-307443号等

【0007】

ここで回折光学素子の光学特性について考えてみると、回折光学素子は、回折効率の観点から考えると位相型の回折光学素子（キノフォーム）を用いることが好ましく、製造の容易さの観点から考えると回折光学素子の断面形状が鋸歯状（ブレード型）又は階段状（バイナリーオプティクス素子）の形状であることが好ましい。ここにいう回折効率とは、回折光学素子に入射する光と、所定の次数の回折光との強度比をいう。断面形状が鋸波状又は階段状である回折光学素子は、両者とも形状誤差等によって結像に寄与しない不要回折光の発生は避けられないが、この不要回折光は、結像光に対する強度比と強度分布が所望の数値以下であるとき、結像性能への影響が実質的に無視できることが、例えば特開平11-307443号公報に示されている。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】

ところで、光源波長の短波長化に伴って照明光の波長が短くなると、光の吸収によって実用に耐える硝材の種類は限られ、波長が180nm以下になると実用上使える硝材は蛍石だけとなる。従って、かかる短波長の照明光の下では屈折レンズのみの構成では色収差の補正が不可能となるため、回折光学素子を用いて色

収差の補正を行う必要がある。

【 0 0 0 9 】

更に、露光波長が紫外光になると、回折光学素子を用いて色収差を補正するために有効なパワーを得るためには回折光学素子周辺部の輪帯幅（ピッチ）を極めて小さく形成する必要がある、その製造が困難となる。このような場合、製造が可能な範囲で回折光学素子のパワーを稼ぎ、できるだけ不要回折光の発生の少ない回折光学素子及びこの回折光学素子を用いた投影光学系が、特開平 5 - 1 5 0 1 0 7 や特開平 5 - 2 9 7 2 0 9、特開平 6 - 3 3 1 9 4 1 等に関示されている。

【 0 0 1 0 】

しかしながら、従来は、大きな開口数を有する極紫外の照明光を用いて解像度 $0.1 \mu\text{m}$ 以下のパターンを形成するための投影光学系としては、回折光学素子の入射角度特性や製造誤差を考慮した上で、十分な結像性能を発揮するための施策が成されていなかった。

【 0 0 1 1 】

本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであり、極紫外の照明光を用いて第 1 面の像を第 2 面に好適な条件で結像することができる投影光学系を提供することを第 1 の目的とする。また、本発明は、コスト上昇を招かずに第 1 の目的を達成することのできる投影光学系を提供することを第 2 の目的とする。更に、本発明は、そのような投影光学系を備え、上記第 2 面に配置されたウェハ上に $0.1 \mu\text{m}$ 以下の微細パターンを形成することのできる露光装置を提供することを第 3 の目的とし、この露光装置を用いたマイクロデバイスの製造方法を提供することを第 4 の目的とする。

【 0 0 1 2 】

【課題を解決するための手段】

上記課題を解決するために、本発明の第 1 の観点による投影光学系は、第 1 面（P 1）の像を第 2 面（P 2）に結像する投影光学系（P L）において、前記第 1 面（P 1）と前記第 2 面（P 2）との間の光路に配置された第 1 の回折光学素子（D 1）と、前記第 1 の回折光学素子（D 1）よりも前記第 2 面側（P 2）の

光路に配置された第 2 の回折光学素子 (D 2) と、前記第 1 の回折光学素子 (D 1) と前記第 2 の回折光学素子 (D 2) との間の光路に配置された負のパワーを有する光学系 (G 2) とを具備することを特徴としている。

本発明の第 1 の観点による投影光学系によれば、第 1 の回折光学素子と第 2 の回折光学素子との間の光路に負のパワーを有する光学系を配置して第 2 の回折光学素子に入射する光束の入射角を調整するようにしており、光束を第 2 の回折光学素子の回折特性通りに回折させることができるので、第 1 面の像を第 2 面に高い精度で結像させることができる。よって、微細なパターン、特に $0.1 \mu\text{m}$ 以下のパターンを第 2 面に結像させるために極めて好適である。

また、本発明の第 1 の観点による投影光学系 (P L) は、前記第 1 面 (P 1) と前記第 1 の回折光学素子 (D 1) との間に配置された前方光学系 (G 1) と、前記第 2 の回折光学素子 (D 2) と前記第 2 面 (P 2) との間の光路に配置された後方光学系 (G 3) とを更に具備し、前記前方光学系 (G 1) は、前記第 1 面 (P 1) での軸上光束をほぼ平行光束に変換して、該平行光束を前記第 1 の回折光学素子 (D 1) へ導き、前記負のパワーを有する光学系 (G 2) は、前記第 1 の回折光学素子 (D 1) を介した前記第 1 面 (P 1) での軸上光束を再びほぼ平行光束に変換して、該平行光束を前記第 2 の回折光学素子 (D 2) へ導くことを特徴としている。

この発明によれば、第 1 面での軸上光束を前方光学系によってほぼ平行光束にして第 1 の回折光学素子へ入射させ、更に第 1 の回折光学素子を介した第 1 面での軸上光束を再びほぼ平行光束に変換して第 2 の回折光学素子へ導くようにしているので、第 1 面の像を第 2 面に高い精度で結像させることができる。また、第 1 の回折光学系及び第 2 の回折光学素子は、前方光学系及び後方光学系並びに負のパワーを有する光学系によって生ずる色収差と逆の特性の色収差特性を有しており、更にペッツバールの条件に影響を与えないため良好に色収差を補正することができるため、第 1 面の像を第 2 面に高い精度で結像させる上で極めて好適である。また、色収差の補正は回折光学素子のみで行っており、色収差を補正するためだけに光路に配置される数枚のレンズを不要としてコストの上昇を抑えることができる。更に、レンズの硝材の制約から色収差をレンズでは補正することが

できない場合であっても、収差特性がレンズとは逆である回折光学素子を用いることによって色収差の補正を行うことができる。更に、第1の回折光学素子及び第2の回折光学素子の2つの回折光学素子を用いることで色収差の補正に必要なパワーを各々の回折光学素子によって得ているため、前方光学系及び後方光学系並びに負のパワーを有する光学系の設計の結果、これらによって生ずる色収差の値が様々であっても適宜補正することができる。

本発明の第2の観点による投影光学系は、第1面（P1）の像を第2面（P2）に結像する投影光学系（PL）において、前記第1面（P1）と前記第2面（P2）との間の光路に配置された回折光学素子（D1、D2）と、前記第1面（P1）と前記回折光学素子（D1、D2）との間の光路に配置された光学系（G1、G2）とを含み、前記投影光学系（PL）の前記第2面（P2）側の開口数をNA、前記第1面（P1）から前記回折光学素子（D1、D2）の直前までの前記光学系（G1、G2）の結像倍率を β 、所定波長に対する前記回折光学素子（D1、D2）の焦点距離をf、前記第1面（P1）から前記第2面（P2）に至る距離をLとすると、以下の条件を満足することを特徴としている。

$$1 / |NA \cdot \beta| < 0.7$$

$$0.38 < f / L < 1.2$$

本発明の第2の観点による投影光学系によれば、上記の条件を満足することで、大きな開口数を有し、且つ角度特性による結像性能劣化がない投影光学系を実現することができ、十分な色収差補正を実現させることができる。また、上記の条件を満足することで、回折光学素子のピッチが極めて微細化されることはなく、比較的広いピッチを有し、製造の容易な回折光学素子を用いることができる。

本発明の第3の観点による投影光学系は、第1面（P1）の像を第2面（P2）に結像するために、前記第1面（P1）と前記第2面（P2）との間の光路に沿って配置された複数の光学素子を有する投影光学系（PL）において、一方の面に形成された回折パターン面（PL1、PL11）と、他方の面に形成された補正面（PL2、PL12）とを有する回折光学素子（D1、D2）を前記光路に沿って少なくとも1つ配置し、前記補正面（PL2、PL12）は、前記回折パターン面（PL1、PL11）の製造誤差を補正することを特徴としている。

本発明の第3の観点による投影光学系によれば、回折パターン面の製造誤差を補正する補正面を回折光学素子に形成しているもので、極めて高い精度の結像特性が要求される投影光学系に用いられる回折格子としては極めて好適である。

ここで、本発明の第3の観点による投影光学系は、前記補正面（P L 2、P L 1 2）が、所定の基準面に対して $0.5\mu\text{m}$ 以下のサグ量で非球面加工が施された微少非球面を有することを特徴としており、前記基準面は、平面又は球面であることを特徴としている。また、本発明の第1の観点から第3の観点による投影光学系は、前記回折光学素子（D 1、D 2）の回折パターンは、全て平面基板に形成されることを特徴としている。

また、本発明の第1の観点から第3の観点による投影光学系は、前記回折光学素子（D 1、D 2）の回折パターンが光軸（A X）を中心とする複数の輪帯領域に形成され、前記各輪帯領域は複数の平面により複数の段で近似されるバイナリーオプティクス素子で形成され、前記各輪帯領域に形成されるバイナリーオプティクス素子は正のパワーをそれぞれ有することを特徴としている。ここで、前記各輪帯領域にそれぞれ形成されるバイナリーオプティクス素子の少なくとも1つの段数は、異なることが好ましく、前記各輪帯領域に応じて透過率が異なるフィルターを、前記回折光学素子の近傍に配置することが好適である。

また、本発明の第1の観点から第3の観点による投影光学系は、前記回折光学素子（D 1、D 2）の回折パターンは光軸（A X）を中心とする複数の輪帯領域に形成され、前記各輪帯領域の各々は正のパワーを持つ鋸歯状の断面形状を有することを特徴としている。ここで、前記回折光学素子の回折パターンが互いに光軸を中心とする第1輪帯領域と第2輪帯領域に形成され、前記第1輪帯領域が、前記第2輪帯領域よりも光軸側に形成されると共に、1次又は-1次回折光に関して回折効率が最も高くなる鋸歯状の断面形状を有し、前記第2輪帯領域が、前記第1輪帯領域よりも周辺側に形成されると共に、 m 次又は $-m$ 次回折光（ m は2以上の整数）に関して回折効率が最も高くなる鋸歯状の断面形状を有することが好適である。

また、本発明の第1の観点から第3の観点による投影光学系は、前記投影光学系（P L）を構成する前記複数の光学素子は、前記第1面（P 1）の像を前記第

2 面 (P 2) に結像することに寄与するレンズを有し、前記投影光学系を構成する全てのレンズは、蛍石で構成されることが好ましい。また、前記負のパワーを有する光学系 (G 2) が、非球面を有することを特徴としている。

本発明の第 4 の観点による投影光学系は、第 1 面 (P 1) の像を第 2 面 (P 2) に結像するために、前記第 1 面 (P 1) と前記第 2 面 (P 2) との間の光路に沿って複数の光学素子をそれぞれ配置し、前記複数の光学素子の少なくとも 1 つは、一方の面に形成された光学面 (P L 1) と他方の面に形成された補正面 (P L 2) とを有し、前記補正面 (P L 2) は、前記光学面 (P L 1) の製造誤差を補正することを特徴としている。

本発明の第 4 の観点による投影光学系によれば、光学素子に形成された光学面の製造誤差を補正面によって補正するようにしているので、極めて高い精度の結像特性が要求される投影光学系に用いられる光学素子としては極めて好適である。

また、本発明の第 4 の観点による投影光学系は、前記補正面 (P L 2) が、所定の基準面に対して $0.5 \mu\text{m}$ 以下のサグ量で非球面加工が施された微少非球面を有することが好ましい。

また、本発明の第 2 の観点による投影光学系は、前記回折光学素子 (D 1 、 D 2) と前記第 2 面 (P 2) との間の光路に正のパワーを有する光学系 (G 3) を配置し、前記第 1 面 (P 1) と前記回折光学素子 (D 1 、 D 2) との間の光路に配置された前記光学系 (G 1) は正のパワーを有することを特徴としている。

本発明の露光装置は、所定のパターンが形成されたマスク (R) を前記第 1 面 (P 1) に設定するマスクステージ (1 4) と、感光性基板 (W) を前記第 2 面 (P 2) に設定する基板ステージ (2 2) と、前記第 1 面 (P 1) に設定された前記マスク (R) を照明する照明光学系 (1 0 、 I L) と、前記マスク (R) のパターン像を前記感光性基板 (W) に投影露光する上記第 1 の観点から第 4 の観定の何れかの投影光学系とを具備することを特徴としている。

本発明の露光装置によれば、第 1 面に配置されたマスクに形成されたパターンの像を第 2 面に配置された感光性基板上に精度良く結像することができるので、ウェハ上に微細なパターン、特に $0.1 \mu\text{m}$ 以下の微細パターンを形成するのに

極めて好適である。

本発明のマイクロデバイスの製造方法は、所定のパターンを有するマスク（R）を前記第1面（P1）に設定する第1設定工程と、感光性基板（W）を前記第2面（P2）に設定する第2設定工程と、前記マスク（R）を照明する照明工程と、上記第1の観点から第4の観点の何れかの投影光学系を用いて前記マスク（R）のパターン像を前記感光性基板（W）に投影露光する露光工程と、転写された前記感光性基板（W）を現像する現像工程とを含むことを特徴としている。

本発明のマイクロデバイスの製造方法によれば、上記露光装置と同様に、第1面に配置されたマスクに形成されたパターンの像を第2面に配置された感光性基板上に精度良く結像することができるので、微細なパターン、特に $0.1\mu\text{m}$ 以下の微細パターンを形成する必要があるマイクロデバイスを製造するのに極めて好適である。

【0013】

【発明の実施の形態】

以下、図面を参照して本発明の実施形態による投影光学系、当該投影光学系を備えた露光装置、及び当該露光装置を用いたマイクロデバイスの製造方法について詳細に説明する図1は、本発明の一実施形態による投影光学系を備えた本発明の一実施形態による露光装置の概略構成を示す図である。本実施形態においては、投影光学系として反射屈折光学系を用いた場合について説明する。尚、以下の説明においては、図1中に示されたXYZ直交座標系を設定し、このXYZ直交座標系を参照しつつ各部材の位置関係について説明する。XYZ直交座標系は、Y軸及びZ軸が紙面に対して平行となるよう設定され、X軸が紙面に対して垂直となる方向に設定されている。また、本発明の一実施形態による投影光学系としての投影光学系PLを構成する反射屈折光学系の基準光軸AXがZ軸に平行となるよう設定しているが、図中のXYZ座標系は、実際にはXY平面が水平面に平行な面に設定され、Z軸が鉛直上方向に設定される。尚、本明細書において、語句「パワー」とは、レンズ又は回折光学素子の屈折力に限らず、焦点距離の逆数を意味する語として用いる。よって、語句「パワー」は、例えば反射型の回折光学素子の焦点距離の逆数をも意味する。

【 0 0 1 4 】

図 1 に示した露光装置は、紫外領域の照明光を供給するための光源 1 0 を備えている。この光源 1 0 としては、例えば Kr F エキシマレーザ（発振波長 2 4 8 nm）、Ar F エキシマレーザ（発振波長 1 9 3 nm）、F₂ エキシマレーザ（発振波長 1 5 7 . 6 2 4 nm）が用いられる。光源 1 0 から射出された光は、照明光学系 I L を介して、所定のパターンが形成されたレチクル R を均一に照明する。尚、光源 1 0 と照明光学系 I L との間の光路はケーシング（不図示）で密封されており、光源 1 0 から照明光学系 I L 中の最もレチクル R 側の光学部材までの空間は、露光光の吸収率が低い気体であるヘリウムガスや窒素等の不活性ガスで置換されているか、あるいはほぼ真空状態に保持されている。

【 0 0 1 5 】

マスクとしてのレチクル R は、レチクルホルダ 1 2 を介して、マスクステージとしてのレチクルステージ 1 4 上において X Y 平面に平行に保持されており、本発明にいう第 1 面に設定されている。レチクル R には転写すべき所定のパターンが形成されており、パターン領域全体のうち X 軸方向に沿って長辺を有し且つ Y 軸方向に沿って短辺を有する矩形状（スリット状）のパターン領域が照明される。レチクルステージ 1 4 は、図示を省略した駆動系の作用により、レチクル面（即ち、X Y 平面）に沿って二次元的に移動可能であり、その位置座標はレチクル移動鏡 1 6 を用いた干渉計 1 8 によって計測され且つ位置制御されるように構成されている。

【 0 0 1 6 】

レチクル R に形成されたパターンの像は、反射屈折型の投影光学系 P L を介して、感光性基板としてのウェハ W 上にレチクルパターン像を形成する。ウェハ W は、ウェハホルダ 2 0 を介して、基板ステージとしてのウェハステージ 2 2 上において X Y 平面に平行に保持され、その表面が本発明にいう第 2 面に設定されている。そして、レチクル R 上での矩形状の照明領域に光学的に対応するように、ウェハ W 上では X 軸方向に沿って長辺を有し且つ Y 軸方向に沿って短辺を有する矩形状の露光領域にパターン像が形成される。ウェハステージ 2 2 は、図示を省略した駆動系の作用によりウェハ面（即ち、X Y 平面）に沿って二次元的に移動

可能であり、その位置座標はウェハ移動鏡 2 4 を用いた干渉計 2 6 によって計測され且つ位置制御されるように構成されている。

【 0 0 1 7 】

また、図 1 に示した露光装置が備える投影光学系 P L を構成する光学部材のうち最もレチクル側に配置された光学部材と最もウェハ W 側に配置された光学部材との間で投影光学系 P L の内部が気密状態を保つように構成され、投影光学系 P L の内部の気体はヘリウムガスや窒素などの不活性ガスで置換されているか、あるいはほぼ真空状態に保持されている。更に、照明光学系 I L と投影光学系 P L との間の狭い光路には、レチクル R 及びレチクルステージ 1 4 等が配置されているが、レチクル R 及びレチクルステージ 1 4 等を密封包囲するケーシング（不図示）の内部に窒素やヘリウムガス等の不活性ガスが充填されているか、あるいはほぼ真空状態に保持されている。また、投影光学系 P L の投影面側には、ウェハ W 及びウェハステージ 2 2 等が配置されているが、ウェハ W 及びウェハステージ 2 2 等を密封包囲するケーシング（不図示）の内部に窒素やヘリウムガス等の不活性ガスが充填されているか、あるいはほぼ真空状態に保持されている。このように、光源 1 0 からウェハ W までの光路の全体に亘って、露光光がほとんど吸収されることのない雰囲気形成されている。

【 0 0 1 8 】

上述したように、投影光学系 P L によって規定されるレチクル R 上の照明領域及びウェハ W 上の露光領域（即ち、実効露光領域）は、Y 軸方向に沿って短辺を有する矩形状である。従って、駆動系及び干渉計 1 8, 2 6 等を用いてレチクル R 及びウェハ W の位置制御を行いながら、矩形状の露光領域及び照明領域の短辺方向、即ち Y 軸方向に沿ってレチクルステージ 1 4 とウェハステージ 2 2 とを、ひいてはレチクル R とウェハ W とを同じ方向へ（即ち、同じ向きへ）同期的に移動（走査）させることにより、ウェハ W 上には露光領域の長辺に等しい幅を有し且つウェハ W の走査量（移動量）に応じた長さを有する領域に対してレチクル R に形成されたパターンが走査露光される。

【 0 0 1 9 】

尚、上記説明ではレチクル R とウェハ W とを投影光学系 P L に対して同期的に

移動させてレチクルRに形成されたパターンをウェハW上に転写するいわゆるステップ・アンド・スキャン方式の露光装置について説明したが、いわゆるステップ・アンド・リピート方式の露光装置（いわゆるステッパー）であってもよい。ステップ・アンド・リピート方式とは、ウェハステージ22をステッピング駆動することによってウェハW上に設定された複数のショット領域の内、何れかを投影光学PLの投影領域に対して位置合わせして、レチクルRに形成されたパターンの像を位置決めされたショット領域に転写する動作を繰り返す方式である。

【 0 0 2 0 】

以上、本発明の一実施形態による露光装置について概説したが、次に本発明の一実施形態による露光装置が備える本発明の一実施形態による投影光学系について図面を参照して詳細に説明する。図2は、本発明の一実施形態による投影光学系PLの光学的構成の基本構成を示すレンズ断面図である。図1において、投影光学系PLの基本構成は、第1面（物体面）P1に設定されたレチクルRから順に、光学系G1、回折光学素子D1、光学系G2、回折光学素子D2、及び光学系G3とを配列して構成されている。そして、投影光学系PLは、レチクルR（物体面）側、及び第2面（像面）P2に配置されたウェハW（像面）側の両方でテレセントリックとなっている。

【 0 0 2 1 】

光学系G1は、第1面P1から順に両凸の正レンズL1と、両凹レンズL2と、第2面P2に凸面を向けた平凸レンズL3とを含んで構成され、全体として正のパワーを有するよう設計されている。この光学系G1は、第1面P1での軸上光束をほぼ平行光束に変換して、該平行光束を回折光学素子D1へ導くものであり、本発明にいう前方光学系をなす。ここで、光学系G1によって第1面P1での軸上光束をほぼ平行光束に変換するのは、回折光学素子D1は、入射する光の入射角度によって回折効率が変わるため、発散光束や収斂光束といった光束を入射させると、結像性能を劣化させてしまう。よって、できるだけ入射光束の入射角のバラツキを小さくして回折光学素子D1の結像性能の劣化を防止するためである。

【 0 0 2 2 】

尚、前述したように、光源 1 0 から出射される光の波長が $200\ \mu\text{m}$ 程度、又は $200\ \mu\text{m}$ よりも短い波長を用いた場合には光学系 G 1 をなすレンズ L 1 ~ L 3 又は光学系 G 3 をなすレンズの硝材が制限され、特に光源 1 0 として F₂エキシマレーザ（発振波長 157.624 nm）を用いた場合には、光学系 G 1 をなすレンズ L 1 ~ L 3 全てが蛍石によって形成される。

【 0 0 2 3 】

回折光学素子 D 1 は、色収差を補正するために設けられる。ここで、回折光学素子 D 1 を用いて色収差の補正を行うのは、図 1 中の光源 1 0 から出射される光が $200\ \mu\text{m}$ 程度の短波長の光であり、光路上に配置することのできるレンズの硝材が制限されるためである。つまり、単一の硝材によって投影光学系 P L を構成すると正レンズによる色収差の補正不足を生じるため、回折光学素子 D 1 に一般的なレンズとは逆の色収差特性を有する回折光学素子を用いてレンズによる色収差を補正している。ここで、一般的なレンズが有する色収差特性とは、波長が短くなるにつれ分散が大となる特性に起因する収差特性をいう。回折光学素子 D 1 は、正レンズの色収差を補正するため正のパワーを有するように設計される。

【 0 0 2 4 】

光学系 G 2 は、本発明にいう負のパワーを有する光学系であり、回折光学素子 D 1 で回折された第 1 面 P 1 での軸上光束を再びほぼ平行光束に変換して回折光学素子 D 2 へ導くために設けられる。ここで、光学系 G 2 によって回折光学素子 D 1 で回折された第 1 面 P 1 での軸上光束を再びほぼ平行光束に変換するのは、前述した光学系 D 1 を設ける理由と同様の理由であり、回折光学素子 D 2 は入射する光の入射角度によって回折効率が変わるため、回折光学素子 D 1 によって回折された光束をそのまま回折光学素子 D 2 に入射させると、回折光学素子 D 2 の結像性能を劣化させてしまう。よって、できるだけ入射光束の入射角のバラツキを小さくして回折光学素子 D 2 の結像性能の劣化を防止するためである。

【 0 0 2 5 】

ここで、回折光学素子 D 1 及び回折光学素子 D 2 の 2 つの回折光学素子を設ける理由は以下の通りである。つまり、回折光学素子 D 1 及び回折光学素子 D 2 は前述の通り、光路上に配置されたレンズによる色収差を補正するために設けられ

るが、この色収差を補正するためにはある程度以上のパワーが必要となる。よって、例えば回折光学素子D 2 及び光学系G 2 を省略して単一の回折光学素子D 1 のみによってレンズの色収差を補正し得るパワーを得ようとする、光源1 0 から出射される光の波長が2 0 0 μ m以下であるため回折光学素子D 1 の格子間隔（ピッチ）が極めて狭くなってしまう。しかしながら、実際には1 μ m以下のピッチを有する回折光学素子は製作上困難であるため、色収差補正に必要となるパワーを得るために図2 に示した回折光学素子D 1 及び回折光学素子D 2 の2 枚の回折光学素子を光路上に配置している。

【 0 0 2 6 】

このように、複数の回折光学素子D 1 及び回折光学素子D 2 を光路上に配置し、回折光学素子D 1 の前段の光路上に光学系G 1 を配置するとともに回折光学素子D 1 と回折光学素子D 2 との間に負のパワーを有する光学系G 3 を配置して、常に回折光学素子D 1 及び回折光学素子D 2 に対して平行光束を入射させることで、十分な色収差補正能力を有するとともに角度特性による結像性能劣化のない投影光学系が実現される。尚、図2 では、光学系G 2 として屈折型の光学系、例えば両凹レンズを例示として図示しているが、光学系G 2 は負の屈折率を有すればよく、例えば凸反射鏡等の反射型の光学系であってもよい。

【 0 0 2 7 】

光学系G 3 は、第1 面P 1 側から順に両凸の正レンズL 4 と、第1 面P 1 に凸面を向けた凸平レンズL 5 とを含んで構成され、全体として正のパワーを有するように設計されている。この光学系G 3 は、回折光学素子D 2 によって回折された光を第2 面P 2 上、即ちウェハW上に結像させるためのものであり、正のパワーを有し、本発明にいう後方光学系をなすものである。尚、前述したように、光源1 0 から出射される光の波長が2 0 0 μ m程度、又は2 0 0 μ mよりも短い波長を用いた場合には光学系G 3 をなすレンズL 4 及びレンズL 5 の硝材が制限され、特に光源1 0 としてF₂エキシマレーザ（発振波長1 5 7 . 6 2 4 n m）を用いた場合には、光学系G 3 をなすレンズL 4 及びレンズL 5 全てが蛍石によって形成される。

【 0 0 2 8 】

露光装置の解像度を $0.1 \mu\text{m}$ 以下とするためには、光源 10 から出射される光の波長として 180 nm よりも短い波長の光を使うことが必須となるが、投影光学系 PL を構成する全てのレンズの材料として螢石を使用することでレンズによる光の吸収が少なくなり、高い光強度を有する照明光によってウェハ W 上を露光することができるので、高スループットを実現することが可能となる。尚、回折光学素子 D1, D2 の基板等は内部透過率が 70% 以上ある材料であれば、厚みを充分薄くすることで使用することができる。

【 0 0 2 9 】

いま、図 2 に示した投影光学系 PL の第 2 面 P2 側の開口数を NA、光学系 G1 の結像倍率を β 、光源 10 から出射される光の波長に対する回折光学素子 D1 及び回折光学素子 D2 の焦点距離を f 、第 1 面 P1 から第 2 面 P2 に至る距離を L とするとき、以下の (1) 式及び (2) 式を満足することが好ましい。

$$1 / | \text{NA} \cdot \beta | < 0.7 \quad \dots\dots (1)$$

$$0.38 < f / L < 1.2 \quad \dots\dots (2)$$

【 0 0 3 0 】

ここで、上記 (1) 式は、大きな開口数を有し、且つ角度特性による結像性能劣化がない投影光学系 PL を実現するための条件を表す式である。また、この (1) 式においては、 $1 / | \text{NA} \cdot \beta |$ の値が 0.55 より小であることが更に好適である。更に、上記 (2) 式は回折光学素子 P1 及び回折光学素子 P2 により十分な色収差補正を実現させるための条件を表す式である。(2) 式において、 f / L の値が下限の値 0.38 以下となると、極めて狭いピッチの回折光学素子 D1、D2 を製作しなければならず、回折光学素子 D1、D2 の製作が困難となる。このように (2) 式の下限值は回折光学素子 D1、D2 の製作の容易さによって決定されている値である。また、上記 (2) 式の上限值は投影光学系 PL の色収差を補正するために十分なパワーを得るための条件を表す式であり、 f / L の値が上限の値 1.2 以上になると、十分な色収差補正ができなくなる。また、この (2) 式においては、回折光学素子の製作容易さ及び色収差補正の度合いを考慮すると、 f / L の値が 0.42 より小であり、1.0 より大であることが更に好適である。また、結像光として高次回折光を利用する場合や、開口数 NA が

0. 7を越えて大きい場合等は、投影光学系PLに配置される回折光学素子全てが上記(1)式及び(2)式を満足することが望ましい。

【0031】

次に、回折光学素子D1、D2の構成について説明する。

〔回折光学素子D1、D2の第1構成例〕

図3は、回折光学素子D1、D2の第1構成例を概略を示す図であって、(a)は斜視図であり、(b)は断面図である。図3(a)、及び図3(b)に示すように、回折光学素子D1、D2の少なくとも一方は回折パターンが形成された回折パターン面PL1以外に、回折パターン面PL1の製造誤差を補正するための補正面PL2を有する。回折パターン面PL1には光軸AXを中心として同心円状に正のパワーを有する複数の輪帶領域k1～k5が形成されており、各々の輪帶領域k1～k5はバイナリーオプティクス素子が形成されている。図3(b)に示すように、各々の領域k1～k5に形成されるバイナリーオプティクス素子はフレネルゾーンプレートの表面を階段状に形成したものであり、通常はゾーンプレートの回折効率を高めるために形成される。

【0032】

ここで、バイナリーオプティクス素子の形成方法について概説する。図4は、バイナリーオプティクス素子の形成方法の一例を示す断面図である。まず、図4(a)に示すように平面基板「0」上に、第一のエッチングストッパ層「A」を設け、SiO₂膜からなる第一の透明層「1」を蒸着によって形成し、更に連続して第一の透明層「1」上に電子ビーム蒸着法でCr膜を、例えば50nmで形成したものを用意する。これが処理対象の基板となる。次に、上記第一のエッチングストッパ層「A」と第一の透明層「1」上にCr膜が形成された基板上にフォトレジストをスピコートなどの塗布法で塗布し、加熱乾燥処理を施し、厚さ0.5μm程度のレジスト層を形成する。続いて、かかる基板を例えば回転露光を行う露光装置等に搬入し、設計するバイナリーオプティクスに応じて、例えば8段階層構造のうちの2段階構造に対応するパターンが形成されたレチクルのパターンの像を基板上に転写する。

【0033】

各種パターンの転写が終了すると、第一のレジストパターンが形成された基板を反応性イオンエッチング装置に入れて、Crを第一のレジストパターンに応じてエッチングし、Crエッチングの後基板W上に設けられたレジストを除去する。以上の操作によってCr膜にレジストパターンが転写されたことになる。続いて、このCrパターンをマスクと、空気面に接した第一の透明層「1」をエッチングする。エッチング終了後、マスクであるCrを除去し、純水リンスと乾燥工程を経て完成する。以上の工程により、第一のエッチングストッパ層「A」が露出した状態で、第一の透明層パターン「1a」が形成される（図4（b）参照）。このように、形成された第一の透明層パターン「1a」の上部のみに Al_2O_3 膜を蒸着し、第二のエッチングストッパ層「B」を形成する（図4（c））。これは、例えば露出した第一のストッパ層「A」上にはレジストを塗布しておき、このレジストごとその上の Al_2O_3 を除去するなどの方法によって第一の透明層パターン「1a」上部のみに第二のエッチングストッパ層「B」を形成する。この時点で、2段階層構造のパターンが形成されている。

【0034】

さらに、図4（a）に示した場合と同様の手法により、露出している第一のストッパ層「A」と、第二のストッパ層「B」との表面上に、第二の透明層「2」を形成する（図4（d）参照）。更に連続して第二の透明層「2」上にCr膜を作製し、このCr膜上にレジストをスピニング塗布し、加熱乾燥処理を施し、厚さ $0.5\mu m$ 程度のレジスト層を形成する。続いて、形成するパターンの形状に応じて8段階層構造のうちの4段階構造に対応するパターンの施されているレチクルを使用して、第二の透明層「2」上のレジストを露光する処理が行われる。この第二のレジストパターンをマスクとして、第二の透明層「2」上のCr膜をエッチングすることによってパターンを転写した後、第二のレジストパターンを取り除く。次に、このCrパターンをマスクとして、第一の透明層「1」のエッチング工程と同様の条件で、第二の透明層「2」の反応性イオンエッチングを行ない、第二の透明層パターン2aを形成する（図4（e）参照）。

【0035】

次に、第二の透明層パターン2a上部のみに、 Al_2O_3 膜を蒸着し、第三のエ

ッチングストッパ層Cを形成する(図4(f)参照)。この時点で、4段階層構造のパターンが形成されている。さらに、上記の4段階層構造を形成するまでと同様の工程を繰返して8段階層構造のパターンを形成する。つまり、露出している第一のストッパ層「A」、第二のストッパ層「B」、及び第三のストッパ層Cの表面上全面に第三の透過層3を形成した(図4(g)参照)た。これら第三の透過層3上にCr膜、レジスト層を形成した後、8段階層構造の回折パターンに対応するレチクルパターンを用いて、パターンの像をレジスト、更にCr膜に順次転写する。この場合にも図4(c)に示した基板W上に既に形成されているパターンと露光処理によって転写が行われる像との位置合わせの際に、図4中のステップS32の処理が行われる。これによって形成されたCrパターンをマスクとして第三の透明層3に反応性イオンエッチングを行ない、第三の透明層パターン3aを形成する(図4(h)参照)。

【0036】

以上の工程を経ることにより、図3(b)に示すバイナリーオプティクス素子が形成された回折光学素子が得られる。このように、回折光学素子D1、D2の回折パターンは平面基板上に形成される。回折光学素子D1、D2の回折パターン面を平面基板上に形成する場合には、露光装置を用いたリソグラフィ工程が可能となり、より微細なパターンからなる回折光学素子の製作が可能となる。また、光軸AXを中心とした同心円状に形成し、各輪帯が複数の平面による階段形状で近似されるバイナリーオプティクス素子にすることで、製作工程を簡略化し、且つ高精度なパターンを製作することができる。

【0037】

尚、図3(b)に示した回折光学素子D1、D2の輪帯領域に形成されるバイナリーオプティクス素子の段数は同一(例えば8段)に形成されるが、回折光学素子D1、D2の外周部近傍の輪帯領域はピッチが狭いため、光軸AXに対する近軸領域に形成されるバイナリーオプティクス素子の段数よりも製造が困難になることが多い。かかる場合には、回折光学素子D1、D2の外周部近傍の輪帯領域に形成されるバイナリーオプティクス素子の段数を少なくして形成すればよい。例えば、ピッチの狭い外周部近傍(例えば、図3(a)中の輪帯領域k4、k

5) は 4 段、不要回折光の影響の大きい中心部 (例えば、図 3 (a) 中の輪帯領域 k_1) は 16 段、その中間部 (例えば、図 3 (a) 中の輪帯領域 k_2 , k_3) が 8 段というように、各輪帯を形成する階段の段数が領域により変えることで、製作可能なパターンで、全体としてより回折効率が高く、不要回折光の影響の小さい回折光学素子となる。また、バイナリーオプティクス素子の段数は、必ずしも光軸 AX 近傍の輪帯領域に形成されたものの段数が多く、回折光学素子 D_1 , D_2 の外周部近傍の輪帯領域に形成されたものが少ない訳ではなく、必要とする回折性能に応じてバイナリーオプティクス素子の段数を設定することも可能である。

【 0 0 3 8 】

また、回折光学素子 D_1 , D_2 に形成される各輪帯領域の段数を変化させるのは、回折光学素子 D_1 , D_2 の製造を容易にするのみならず、ウェハ W 上に到達するフレア光を減少させるためでもある。ここで、フレア光とは、回折光学素子 D_1 , D_2 に回折された不要な次数の光をいう。レチクル R に形成されたパターンをウェハ W 上に精度良く結像させるためには、フレア光は極力少なくすることが好ましい。ここで、投影光学系 PL 中で生ずるフレア光の内、光軸 AX の近軸領域を通過するフレア光の多くがウェハ W まで到達し、遠軸領域を通過するフレア光はレンズ外へ進んでウェハ W 上に到達する割合が少ない。よって、近軸領域において不要なフレア光の発生を抑え、必要とする次数の回折効率が大となるよう回折光学素子 D_1 , D_2 のピッチを狭く設計し、遠軸領域ではフレア光の発生割合が比較的大であってもウェハ W 上に到達するフレア光の割合が少ないので、ピッチを広く設定する。

【 0 0 3 9 】

また、上述のように、輪帯領域毎に形成するバイナリーオプティクス素子の段数を変えた場合、段数が変わる境界において結像光の強度分布が階段状に変わるため、結像性能の劣化が生ずることが考えられる。つまり、例えば回折光学素子 D_1 , D_2 の外周部近傍において段数を少なくした場合には、フレネルゾーンプレートからのずれが大きくなるため、回折効率が小さくなる。この場合には、回折光学素子 D_1 , D_2 の近傍に各々の輪帯領域に応じて透過率が設定されたフィ

ルターを配置することで、回折光の強度分布を一様にすることができ、その結果結像性能の劣化を防ぐことができる。

【 0 0 4 0 】

次に、回折光学素子 D 1, D 2 に形成される補正面 P L 2 について説明する。補正面 P L 2 は、回折光学素子 D 1, D 2 の回折パターン面 P L 1 の製作誤差による波面収差を補正するものであり、平面又は球面等の所定の基準面からのサグ量が $0.5 \mu\text{m}$ 以下である微小非球面が形成されている。この微小非球面の面形状は、球面又は平面を計測するための干渉計、例えばフィゾー干渉計で計測することができるため、より高精度な形状で微小非球面を形成することができる。

【 0 0 4 1 】

〔回折光学素子 D 1, D 2 の第 2 構成例〕

次に、回折光学素子 D 1, D 2 の第 2 構成例について説明する。図 5 は、回折光学素子 D 1, D 2 の第 2 構成例を概略を示す図であって、(a) は斜視図であり、(b) は断面図である。図 5 (a) 及び図 5 (b) に示すように、回折光学素子 D 1, D 2 は光軸 A X を中心とした同心円状の輪体形状に形成され、鋸歯状の切断面を有する回折パターン面 P L 1 1 を有する。また、図 3 に示した回折光学素子 D 1, D 2 が有する補正面 P L 2 と同様の補正面 P L 1 2 が形成されていても良い。図 5 に示したように、各輪帶領域に輪帯状に形成される鋸歯状の回折パターンは、各輪帯が任意の次数の回折光について、ある所定の回折効率を満足するよう形成されている。

【 0 0 4 2 】

また、回折光学素子 D 1, D 2 の断面形状を鋸歯状にする場合、製造の容易さを考慮し、光軸 A X から所定の距離離れた位置までを第 1 輪帶領域とし、その外側の輪帶領域を第 2 輪帶領域、第 3 輪帶領域、…とすると、第 1 輪帶領域を 1 次又は -1 次回折光で回折効率が最も高くなる鋸歯状の断面形状とし、その外側の輪帶領域は m 次又は -m 次回折光 (m は、 $m > 2$ を満たす整数) で回折効率が最も高くなる鋸歯状の断面形状とすることが好ましい。このように設定することで、各輪帯の最小ピッチを小さくしなくても、回折光学素子 D 1, D 2 のパワーを高く設定することができる。ここで、上記の構成にして高次の回折光を利用す

るようにした場合には、角度特性はさらに不利になるが、本実施形態では、光学系 G 1 によって回折光学素子 D 1 に平行光を入射させ、光学系 G 2 によって回折光学素子 D 2 に平行光を入射させているため、回折光学素子 D 1, D 2 に入射する光束の入射角のバラツキが極めて小さく、余り問題とはならない。

【 0 0 4 3 】

また、投影光学系 P L の軸上色収差を補正するためには、回折光学素子 D 1, D 2 のパワーを所望の大きさにする必要があるが、大きなパワーを有する回折光学素子 D 1, D 2 を作成しようとする、回折光学素子 D 1, D 2 周辺部のピッチが小さくなりすぎてしまう。そこで、回折光学素子 D 1, D 2 の中心位置から外周部へ行くに従いパワーが小さくなるようにピッチ配列を決めると、軸上色収差は補正されたまま、周辺部のピッチが小さくなりすぎるのを防ぐことができるが、かかるピッチの配列は球面収差を過剰に補正してしまう。そこで、投影光学系 P L 中に少なくとも 2 つの回折光学素子 D 1 及び回折光学素子 D 2 を配置し、回折光学素子 D 1 と回折光学素子 D 2 との間の光路中に、少なくとも 1 つの球面収差を過剰に補正しないような非球面レンズを配置するか、又は光学系 G 3 の一面を非球面にすることで、良好に収差補正された投影光学系が実現される。尚、以上説明した本実施形態においては、補正面 P L 2 又は補正面 P L 1 2 は回折光学素子 D 1, D 2 の回折パターン面 P L 1 又は回折パターン面 P L 1 1 の製作誤差を補正する目的で回折光学素子 D 1, D 2 の一方の面に設けられているが、本発明は回折光学素子に限ることがなく、この技術的思想を光学素子一般に適用することができるものである。

【 0 0 4 4 】

次に、以上説明した投影光学系 P L を介した照明光がウェハ W 上に照射される様子について説明する。図 6 は、投影光学系 P L を介した照明光がウェハ W 上に照射される様子を示す図である。図 6 において、投影光学系 P L から出射されてウェハ W 上に照射される照明光の内、設計上照明領域 E X を照射する照明光は、図中符号 r 1 を付した光束と符号 r 2 を付した光束との間の照明光である。しかしながら、回折光学素子 D 1, D 2 等を用いているため、フレア光が生ずる。フレア光は、図中符号 r 1 1, r 1 2 で示した光束の付近に現れることが多い。よ

って、このフレア光がウェハW上に照射されるのを防止するために、投影光学系PLとウェハWとの間に視野絞り30を設けるのが好ましい。

【0045】

【実施例】

次に、本発明の一実施形態による投影光学系PLの実施例について説明する。

〔第1実施例〕

図7は、本発明の一実施形態による投影光学系PLの第1実施例の光学的構成を示すレンズ断面図である。本実施例における波長 λ は、157.6244nmである。図7において、投影光学系PLは、第1面P1に配置されたレチクルR（物体面）側から順に、正の屈折力を有する第1レンズ群G11と、負の屈折力を有する第2レンズ群G12と、正のパワーを有する回折光学素子D11と、第1面P1に凹面を向けた負の屈折力を有する負メニスカスレンズL24と、正のパワーを有する回折光学素子D12と、正の屈折力を有するレンズ群G13とを配列して構成されている。そして、その投影光学系は、レチクルR（物体面）側、及び第2面P2に配置されたウェハW（像面）側の両方でテレセントリックとなっている。尚、第1レンズ群G11及び第2レンズ群G12は、図2に示した光学系G1に相当し、回折光学素子D11及び回折光学素子D12は図2中の回折光学素子D1及び回折光学素子D2にそれぞれ相当し、負メニスカスレンズL24は図2に示した光学系G2に相当し、第3レンズ群13は図1に示した光学系G3に相当する。

【0046】

第1レンズ群G1は、第1面P1側から順に、第2面P1側に凹面を向けた負メニスカスレンズL11と、両凹レンズL12と、第2面P2側に凸面を向けた正メニスカスレンズL13と、両凸レンズL14と、両凸レンズL15と、第1面P1側に凸面を向けた正メニスカスレンズL16と、第2面P2に凹面を向けた負メニスカスレンズL17と、第2面P2に凹面を向けた負メニスカスレンズL18とからなる8枚のレンズを配置して構成されている。尚、負メニスカスレンズL11の第1面P1側の面c1、両凹レンズL12の第2面側の面c2、及び負メニスカスレンズL17の第2面側P2の面c3は非球面に形成されている

【0047】

次に、第2レンズ群G12は、第1面P1から順に、両凹レンズL19と、両凹レンズL20と、第1面P1に凹面を向けた負メニスカスレンズL21と、第2面P2に凸面を向けた正メニスカスレンズL22と、第1面P1に凸面を向けた正メニスカスレンズL23とからなる5枚のレンズを配置して構成されている。尚、両凹レンズL20の第2面P2側の面c4は非球面に形成されている。回折光学素子D11及び回折格子D12は、その位置に応じて異なる回折特性を有するように設計されている。よって、本実施例においては、回折光学素子D11及び回折光学素子D12を非球面レンズと同様に扱って収差計算を行っている。尚、負メニスカスレンズL24と回折光学素子D12との間には投影光学系PLの開口数（N. A.）を決定する可変の開口絞りASが配置されている。

【0048】

第3レンズ群G13は、第1面P1側から順に、両凸レンズL25と、第1面P1側に凸面を向けた正メニスカスレンズL26と、第1面P1側に凸面を向けた正メニスカスレンズL27と、第1面P1側に凸面を向けた正メニスカスレンズL28と、第1面P1側に凸面を向けた正メニスカスレンズL29とからなる5枚のレンズを配置して構成されている。尚、正メニスカスレンズL28の第2面P2側の面c5は非球面に形成されている。

【0049】

次に、本発明の一実施形態による投影光学系PLの第1実施例の諸元の値について示すが、投影光学系PL内の負メニスカスレンズL11の第1面P1側の面c1、両凹レンズL12の第2面側の面c2、負メニスカスレンズL17の第2面側P2の面c3、両凹レンズL20の第2面P2側の面c4、正メニスカスレンズL28の第2面P2側の面c5は非球面に形成されており、これらの面は、以下の（3）式によって表現する。

【数 1】

$$Z = \frac{\rho \cdot Y^2}{1 + \sqrt{(1 - (1 + \kappa) \cdot \rho^2 \cdot Y^2)}} + (A) \cdot Y^4 + (B) \cdot Y^6 + (C) \cdot Y^8 + (D) \cdot Y^{10} \\ + (E) \cdot Y^{12} + (F) \cdot Y^{14} + (G) \cdot Y^{16} + (H) \cdot Y^{18} + (J) \cdot Y^{20} \quad \dots (3)$$

【0 0 5 0】

但し、上記（3）式において、

z : 光軸でレンズに接する接平面からのずれ（サグ量）

ρ : 曲率

Y : 光軸からの距離

k : 円錐定数

A : 4 次非球面係数

B : 6 次非球面係数

C : 8 次非球面係数

D : 1 0 次非球面係数

E : 1 2 次非球面係数

F : 1 4 次非球面係数

G : 1 6 次非球面係数

H : 1 8 次非球面係数

J : 2 0 次非球面係数

である。更に、回折光学素子 D 1 1 及び回折光学素子 D 1 2 は、仮想屈折率は 1 0 0 1 とする ultra-high index 法により設計されている。

【0 0 5 1】

以下に示す表 1 は、本発明の一実施形態による投影光学系 P L の第 1 実施例の諸元の値を示す表である。表 1 に示した数値の単位はミリメートルであり、小数点以下 3 桁は切り捨てて示している。図 7 中の第 1 面 P 1 の位置から負メニスカスレンズ L 1 1 の第 1 面 P 1 側の面 c 1 までの距離は 5 5 m m に設定され、正メ

ニスカスレンズL29の第2面P2側の面から、第2面P2までの距離は13.196mmに設定され、第1面P1から第2面P2までの距離は986mmに設定されている。また、回折光学素子D11の焦点距離は509.8mmであり回折光学素子D12の焦点距離は702.9mmである。更に、前述した(1)式に示した $1/|NA \cdot \beta|$ の値は、0.122であり、(2)式に示した f/L の値は0.517である。

【0052】

また、各レンズの硝材は螢石であり、使用波長における螢石の屈折率は、1.559であり、分散($dn/d\lambda$)は $-2.605E-6/pm$ である。また、表1では、回折光学素子D11、D12の基板として螢石を挙げているが、この基板は螢石に限らず、例えば石英、水酸基が混入していない石英を用いても良い。

【0053】

但し、表1において、投影光学系PLの第2面P2側の開口数は0.75であり、倍率は $1/4$ であり、視野像は $\phi 23m$ であり、 $22 \times 6mm$ の長方形視野である。更に、表1において、左端の数字は第1面P1側からのレンズ面の順序、 r はレンズ面の曲率半径、 d は当該レンズ面から次のレンズ面までの間隔である。また表1では、各レンズの配置を容易にするため、当該レンズ面から次のレンズ面までの硝材を示している。

【0054】

[表1]

面番号	r	d	硝材
1 : (非球面)	3898.447	13.306	螢石
2 :	486.711	16.403	
3 :	-168.587	23.207	螢石
4 : (非球面)	2227.726	10.443	
5 :	-327.045	49.709	螢石
6 :	-215.624	1.000	
7 :	1696.173	28.030	螢石

8 :	-325.178	1.000	
9 :	521.134	32.820	螢石
1 0 :	-419.204	1.000	
1 1 :	171.992	25.652	螢石
1 2 :	330.412	4.280	
1 3 :	139.024	32.100	螢石
1 4 : (非球面)	128.269	10.277	
1 5 :	183.435	36.732	螢石
1 6 :	102.175	30.874	
1 7 :	-260.834	13.139	螢石
1 8 :	420.621	67.092	
1 9 :	-97.580	16.089	螢石
2 0 : (非球面)	463.064	26.354	
2 1 :	-136.183	39.289	螢石
2 2 :	-154.619	1.000	
2 3 :	-305.514	34.294	螢石
2 4 :	-143.368	4.468	
2 5 :	229.134	37.386	螢石
2 6 :	2869.502	3.441	
2 7 :	∞	15.000	螢石 (D 1 1 の基板)
2 8 :	∞	0.000	
2 9 : (非球面)	-509824.084	25.911	(回折光学素子 D 1 1)
3 0 :	-312.844	20.257	螢石
3 1 :	-174441.248	20.000	
3 2 :	∞	32.069	(開口 A S)
3 3 :	∞	15.000	螢石 (D 1 2 の基板)
3 4 :	∞	0.000	
3 5 : (非球面)	-702884.42	34.402	(回折光学素子 D 1 2)
3 6 :	692.885	30.706	螢石

3 7 :	-744.752	2.453	
3 8 :	418.127	27.577	螢石
3 9 :	40398.612	1.538	
4 0 :	155.116	40.970	螢石
4 1 :	167.602	4.018	
4 2 :	108.981	38.699	螢石
4 3 : (非球面)	789.046	14.481	
4 4 :	361.204	35.201	螢石
4 5 :	1755.193		

【 0 0 5 5 】

また、上記表 1 に示した各レンズ面の内、非球面に関する非球面係数を以下の表 2 に示す

[表 2]

第 1 面

$\kappa : 0.000$	A : 0.173E-06	B : -.100E-10	C : 0.558E-15
D : -.395E-19	E : 0.433E-23	F : -.453E-27	G : 0.000E+00
H : 0.000E+00	J : 0.000E+00		

第 4 面

$\kappa : 0.000$	A : 0.481E-07	B : -.587E-11	C : 0.370E-15
D : -.848E-20	E : -.782E-24	F : 0.550E-28	G : 0.000E+00
H : 0.000E+00	J : 0.000E+00		

第 1 4 面

$\kappa : 0.000$	A : 0.193E-08	B : 0.152E-11	C : 0.266E-16
D : 0.727E-20	E : -.325E-24	F : 0.837E-28	G : 0.000E+00
H : 0.000E+00	J : 0.000E+00		

第 2 0 面

$\kappa : 0.000$	A : 0.872E-08	B : -.233E-11	C : 0.121E-15
D : -.929E-20	E : 0.471E-24	F : -.111E-28	G : 0.000E+00
H : 0.000E+00	J : 0.000E+00		

第29面

$\kappa : 0.000$ $A : 0.123E-10$ $B : -.491E-16$ $C : -.334E-20$
 $D : -.876E-25$

第35面

$\kappa : 0.000$ $A : 0.449E-11$ $B : 0.342E-15$ $C : -.635E-22$
 $D : 0.800E-25$

第43面

$\kappa : 0.000$ $A : 0.393E-08$ $B : 0.359E-11$ $C : -.150E-15$
 $D : -.199E-19$ $E : 0.554E-23$ $F : -.422E-27$ $G : 0.000E+00$
 $H : 0.000E+00$ $J : 0.000E+00$

【0056】

図8は、本発明の一実施形態による投影光学系PLの第1実施例の子午方向（タンジェンシャル方向）及び球欠方向（サジタル方向）における横収差図（コマ収差図）を示す図である。各収差図において、実線は光の波長が157.6244（ $=\lambda$ ）nmである場合であり、点線は波長が $\lambda + 1.1$ μ mの波長の場合であり、一点鎖線は波長が $\lambda - 1.1$ μ mの波長の場合である。尚、図8中の数値の単位はミリメートルであり、上から順にウェハW上の像高が11.5mmである場合、6mmである場合、及び0mmである場合について図示している。これらの収差図より、第1実施例では、波長 λ において収差が極めて少ないことが分かる。また、波長 λ からずれた波長の場合であっても、さほど大きな色収差は発生していないことが分かる。この場合、回折光学素子D11に形成される最小ピッチは、1.00 μ mであり、回折光学素子D12に形成される最小ピッチは、1.52 μ mである。以上の本実施例によれば、極紫外の照明光を用いて第1面の像を第2面に好適な条件で結像することができる。

【0057】

〔第2実施例〕

図9は、本発明の一実施形態による投影光学系PLの第2実施例の光学的構成を示すレンズ断面図である。本実施例における波長 λ は、第1実施例と同様に、157.6244 nmである。図9において、投影光学系PLは、第1面P1に

配置されたレチクルR（物体面）側から順に、正の屈折力を有する第1レンズ群G21と、負の屈折力を有する第2レンズ群G22と、正のパワーを有する回折光学素子D21と、両凹レンズL54と、正のパワーを有する回折光学素子D22と、正の屈折力を有するレンズ群G23とを配列して構成されている。また、第1実施例と同様に、レチクルR（物体面）側、及び第2面P2に配置されたウェハW（像面）側の両方でテレセントリックとなっている。尚、第1レンズ群G21及び第2レンズ群G22は、図2に示した光学系G1に相当し、回折光学素子D21及び回折光学素子D22は図2中の回折光学素子D1及び回折光学素子D2にそれぞれ相当し、両凹レンズL54は図2に示した光学系G2に相当し、第3レンズ群23は図1に示した光学系G3に相当する。

【0058】

第1レンズ群G21は、第1面P1側から順に、両凹レンズL41と、両凹レンズL12と、第1面P1側に凹面を向けた負メニスカスレンズL42と、第2面P2側に凸面を向けた正メニスカスレンズL43と、両凸レンズL44と、両凸レンズL45と、第1面P1側に凸面を向けた正メニスカスレンズL46と、第1面P1側に凸面を向けた正メニスカスレンズL47と、第2面側に凹面を向けた負メニスカスレンズL48とからなる8枚のレンズを配置して構成されている。尚、両凹レンズL41の第1面P1側の面c11、両凹レンズL12の第2面P2側の面P12、正メニスカスレンズL47の第2面P2側の面c13は非球面に形成されている。

【0059】

次に、第2レンズ群G22は、第1面P1から順に、両凹レンズL49と、両凹レンズL50と、第1面P1側に凹面を向けた負メニスカスレンズL51と、第2面P2に凸面を向けた正メニスカスレンズL52と、両凸レンズ53とからなる5枚のレンズを配置して構成されている。尚、両凹レンズL50との第2面P2側の面c14は非球面に形成されている。また、回折光学素子D21及び回折格子D22は、その位置に応じて異なる回折特性を有するように設計されており、第1実施例と同様に、回折光学素子D21及び回折光学素子D22を非球面レンズと同様に扱って収差計算を行っている。更に、本実施例では、回折光学素

子D21と回折光学素子D22との間に配置された両凹レンズL54の第2面P2側の面c14が非球面に設計されている。尚、両凹レンズL54と回折光学素子D22との間には投影光学系PLの開口数(N.A.)を決定する可変の開口絞りASが配置されている。

【0060】

第3レンズ群G23は、第1面P1側から順に、両凸レンズL55と、第1面P1側に凸面を向けた正メニスカスレンズL56と、第1面P1側に凸面を向けた正メニスカスレンズL57と、第1面P1側に凸面を向けた正メニスカスレンズL58と、凸平レンズL59とからなる5枚のレンズを配置して構成されている。尚、正メニスカスレンズL58の第2面P2側の面c16は非球面に形成されている。

【0061】

以下に示す表3は、本発明の一実施形態による投影光学系PLの第2実施例の諸元の値を示す表である。表3に示した数値の単位はミリメートルであり、小数点以下3桁は切り捨てて示している。図9中の第1面P1の位置から両凹レンズL41の第1面P1側の面c11までの距離は55mmに設定され、凸平レンズL59の第2面P2側の面から、第2面P2までの距離は13.000mmに設定され、第1面P1から第2面P2までの距離は1024mmに設定されている。また、回折光学素子D21の焦点距離は484.0mmであり回折光学素子D22の焦点距離は660.0mmである。更に、前述した(1)式に示した $1/|NA \cdot \beta|$ の値は、-0.010であり、(2)式に示した f/L の値は0.473である。また、各レンズの硝材は蛍石であり、使用波長における蛍石の屈折率は、1.559であり、分散($dn/d\lambda$)は $-2.605E-6/pm$ である。

【0062】

但し、表3において、投影光学系PLの第2面P2側の開口数は0.75であり、倍率は $1/4$ であり、視野像は $\phi 23m$ であり、 $22 \times 6mm$ の長方形視野である。更に、表1において、左端の数字は第1面P1側からのレンズ面の順序、 r はレンズ面の曲率半径、 d は当該レンズ面から次のレンズ面までの間隔であ

る。また表 1 では、各レンズの配置を容易にするため、当該レンズ面から次のレンズ面までの硝材を示している。

【 0 0 6 3 】

また、表 3 では、各レンズの配置を容易にするため、当該レンズ面から次のレンズ面までの硝材を示している。また、表 3 では、回折光学素子 D 2 1, D 2 2 の基板として蛍石を挙げているが、この基板は蛍石に限らず、例えば石英、水酸基が混入していない石英を用いても良いのは第 1 実施例と同様である。更に、回折光学素子 D 2 1 及び回折光学素子 D 2 2 は、第 1 実施例と同様に仮想屈折率を 1 0 0 1 とした ultra-high index 法により設計されている。

【 0 0 6 4 】

[表 3]

面番号	r	d	硝材
1 : (非球面)	-1369.992	16.233	螢石
2 :	290.313	21.361	
3 :	-171.366	15.555	螢石
4 : (非球面)	-3754.999	7.864	
5 :	-504.939	49.546	螢石
6 :	-203.373	2.176	
7 :	34133.009	33.313	螢石
8 :	-210.834	1.000	
9 :	618.914	25.606	螢石
1 0 :	-660.786	1.000	
1 1 :	149.583	29.844	螢石
1 2 :	307.782	1.000	
1 3 :	140.106	29.162	螢石
1 4 : (非球面)	172.830	9.848	
1 5 :	421.804	23.405	螢石
1 6 :	103.521	31.676	
1 7 :	-260.885	18.193	螢石

1 8 :	433.853	80.189	
1 9 :	-99.106	30.213	螢石
2 0 : (非球面)	674.459	28.426	
2 1 :	-124.630	38.330	螢石
2 2 :	-143.905	1.000	
2 3 :	-612.558	32.321	螢石
2 4 :	-200.000	1.000	
2 5 :	1174.146	41.004	螢石
2 6 :	-292.606	1.000	
2 7 :	∞	15.000	螢石 (D 2 1 の基板)
2 8 :	∞	0.000	
2 9 : (非球面)	-484309.817	40.728	(回折光学素子 D 2 1)
3 0 :	-2397.653	20.257	螢石
3 1 : (非球面)	360.526	42.700	
3 2 :	∞	48.118	(開口 A S)
3 3 :	∞	13.013	螢石 (D 2 2 の基板)
3 4 :	∞	0.000	
3 5 : (非球面)	-659916.992	16.667	(回折光学素子 D 2 2)
3 6 :	729.160	29.578	螢石
3 7 :	-729.160	3.317	
3 8 :	462.425	23.973	螢石
3 9 :	14595.759	1.221	
4 0 :	315.432	23.545	螢石
4 1 :	356.945	1.000	
4 2 :	131.719	43.074	螢石
4 3 : (非球面)	1380.673	18.685	
4 4 :	272.686	45.834	螢石
4 5 :	∞		

【 0 0 6 5 】

また、上記表 3 に示した各レンズ面の内、非球面に関する非球面係数を以下の表 4 に示す

[表 4]

第 1 面

$\kappa : 0.000$	A : 0.206E-06	B : -.182E-10	C : 0.111E-14
D : -.168E-18	E : 0.322E-22	F : -.349E-26	G : 0.000E+00
H : 0.000E+00	J : 0.000E+00		

第 4 面

$\kappa : 0.000$	A : 0.947E-07	B : -.110E-10	C : 0.306E-15
D : 0.246E-19	E : -.298E-23	F : 0.379E-28	G : 0.000E+00
H : 0.000E+00	J : 0.000E+00		

第 1 4 面

$\kappa : 0.000$	A : -.561E-07	B : 0.756E-12	C : -.984E-16
D : -.187E-20	E : -.208E-24	F : -.712E-30	G : 0.000E+00
H : 0.000E+00	J : 0.000E+00		

第 2 0 面

$\kappa : 0.000$	A : 0.514E-07	B : -.323E-11	C : 0.376E-16
D : 0.116E-19	E : -.918E-24	F : 0.171E-28	G : 0.000E+00
H : 0.000E+00	J : 0.000E+00		

第 2 9 面

$\kappa : 0.000$	A : 0.150E-10	B : 0.717E-16	C : 0.416E-20
D : 0.528E-26			

第 3 1 面

$\kappa : 0.000$	A : -.210E-07	B : -.117E-12	C : -.559E-17
D : 0.637E-21	E : -.193E-26	F : 0.578E-30	G : 0.000E+00
H : 0.000E+00	J : 0.000E+00		

第 3 5 面

$\kappa : 0.000$	A : 0.516E-11	B : 0.778E-16	C : -.158E-20
D : -.948E-25			

第 4 3 面

$\kappa : 0.000$ $A : -.166E-08$ $B : 0.368E-11$ $C : -.349E-15$
 $D : 0.361E-19$ $E : -.305E-23$ $F : 0.141E-27$ $G : 0.000E+00$
 $H : 0.000E+00$ $J : 0.000E+00$

【 0 0 6 6 】

図 1 0 は、本発明の一実施形態による投影光学系 P L の第 2 実施例の子牛方向（タンジェンシャル方向）及び球欠方向（サジタル方向）における横収差図（コマ収差図）を示す図である。各収差図において、実線は光の波長が 1 5 7 . 6 2 4 4 (= λ) n m である場合であり、点線は波長が $\lambda + 1 . 1$ p m の波長の場合であり、一点鎖線は波長が $\lambda - 1 . 1$ p m の波長の場合である。尚、図 1 0 中の数値の単位はミリメートルであり、上から順にウェハ W 上の像高が 1 1 . 5 m m である場合、6 m m である場合、及び 0 m m である場合について図示している。これらの収差図より、第 2 実施例においても、波長 λ において収差が極めて少ないことが分かる。また、波長 λ からずれた波長の場合であっても、さほど大きな色収差は発生していないことが分かる。この場合、回折光学素子 D 2 1 に形成される最小ピッチは、1 . 1 4 μ m であり、回折光学素子 D 2 2 に形成される最小ピッチは、1 . 2 0 μ m である。以上の本実施例によれば、極紫外の照明光を用いて第 1 面の像を第 2 面に好適な条件で結像することができる。

【 0 0 6 7 】

以上、本発明の一実施形態による投影光学系 P L の第 1 実施例及び第 2 実施例について説明したが、次に本発明の一実施形態による露光装置及び露光方法をリソグラフィ工程で使用したマイクロデバイスの製造方法の実施形態について説明する。図 1 1 は、マイクロデバイス（I C や L S I 等の半導体チップ、液晶パネル、CCD、薄膜磁気ヘッド、マイクロマシン等）の製造例のフローチャートを示す図である。図 1 1 に示すように、まず、ステップ S 1 0（設計ステップ）において、マイクロデバイスの機能・性能設計（例えば、半導体デバイスの回路設計等）を行い、その機能を実現するためのパターン設計を行う。引き続き、ステップ S 1 1（マスク製作ステップ）において、設計した回路パターンを形成したマスク（レチクル）を製作する。一方、ステップ S 1 2（ウェハ製造ステップ）

において、シリコン等の材料を用いてウェハを製造する。

【 0 0 6 8 】

次に、ステップ S 1 3（ウェハ処理ステップ）において、ステップ S 1 0 ～ ステップ S 1 2 で用意したマスクとウェハを使用して、後述するように、リソグラフィ技術等によってウェハ上に実際の回路等を形成する。次いで、ステップ S 1 4（デバイス組立ステップ）において、ステップ S 1 3 で処理されたウェハを用いてデバイス組立を行う。このステップ S 1 4 には、ダイシング工程、ボンディング工程、及びパッケージング工程（チップ封入）等の工程が必要に応じて含まれる。最後に、ステップ S 1 5（検査ステップ）において、ステップ S 1 4 で作製されたマイクロデバイスの動作確認テスト、耐久性テスト等の検査を行う。こうした工程を経た後にマイクロデバイスが完成し、これが出荷される。

【 0 0 6 9 】

図 1 2 は、半導体デバイスの場合における、図 1 1 のステップ S 1 3 の詳細なフローの一例を示す図である。図 1 2 において、ステップ S 2 1（酸化ステップ）においてはウェハの表面を酸化させる。ステップ S 2 2（CVDステップ）においてはウェハ表面に絶縁膜を形成する。ステップ S 2 3（電極形成ステップ）においてはウェハ上に電極を蒸着によって形成する。ステップ S 2 4（イオン打込みステップ）においてはウェハにイオンを打ち込む。以上のステップ S 2 1 ～ ステップ S 2 4 のそれぞれは、ウェハ処理の各段階の前処理工程を構成しており、各段階において必要な処理に応じて選択されて実行される。

【 0 0 7 0 】

ウェハプロセスの各段階において、上述の前処理工程が終了すると、以下のようにして後処理工程が実行される。この後処理工程では、まず、ステップ 2 5（レジスト形成ステップ）において、ウェハに感光剤を塗布する。引き続き、ステップ 2 6（露光ステップ）において、上で説明したリソグラフィシステム（露光装置）及び露光方法によってマスクの回路パターンをウェハに転写する。次に、ステップ 2 7（現像ステップ）においては露光されたウェハを現像し、ステップ 2 8（エッチングステップ）において、レジストが残存している部分以外の部分の露出部材をエッチングにより取り去る。そして、ステップ 2 9（レジスト除去

ステップ) において、エッチングが済んで不要となったレジストを取り除く。これらの前処理工程と後処理工程とを繰り返し行うことによって、ウェハ上に多重に回路パターンが形成される。

【 0 0 7 1 】

以上説明した本実施形態のマイクロデバイス製造方法を用いれば、露光工程（ステップ 2 6）において上記の露光装置及び上で説明した露光方法が用いられ、真空紫外域の露光光により解像力の向上が可能となり、しかも露光量制御を高精度に行うことができるので、結果的に最小線幅が $0.1 \mu\text{m}$ 程度の高集積度のデバイスを歩留まり良く生産することができる。

【 0 0 7 2 】

また、半導体素子等のマイクロデバイスだけではなく、光露光装置、EUV 露光装置、X線露光装置、及び電子線露光装置等で使用されるレチクル又はマスクを製造するために、マザーレチクルからガラス基板やシリコンウェハ等へ回路パターンを転写する露光装置にも本発明を適用できる。ここで、DUV（深紫外）やVUV（真空紫外）光等を用いる露光装置では、一般的に透過型レチクルが用いられ、レチクル基板としては石英ガラス、フッ素がドーパされた石英ガラス、蛍石、フッ化マグネシウム、又は水晶等が用いられる。また、プロキシミティ方式のX線露光装置や電子線露光装置等では、透過型マスク（ステンシルマスク、メンブレンマスク）が用いられ、マスク基板としてはシリコンウェハ等が用いられる。なお、このような露光装置は、WO 9 9 / 3 4 2 5 5 号、WO 9 9 / 5 0 7 1 2 号、WO 9 9 / 6 6 3 7 0 号、特開平 11 - 194479 号、特開 2000 - 12453 号、特開 2000 - 29202 号等の開示されている。

【 0 0 7 3 】

もちろん、半導体素子の製造に用いられる露光装置だけではなく、液晶表示素子（LCD）等を含むディスプレイの製造に用いられてデバイスパターンをガラスプレート上へ転写する露光装置、薄膜磁気ヘッドの製造に用いられてデバイスパターンをセラミックウェハ上へ転写する露光装置、及びCCD等の撮像素子の製造に用いられる露光装置等にも本発明を適用することができる。

【 0 0 7 4 】

【発明の効果】

以上、説明したように、本発明の第1の観点による投影光学系によれば、第1の回折光学素子と第2の回折光学素子との間の光路に負のパワーを有する光学系を配置して第2の回折光学素子に入射する光束の入射角を調整するようにしており、光束を第2の回折光学素子の回折特性通りに回折させることができるので、第1面の像を第2面に高い精度で結像させることができる。よって、微細なパターン、特に $0.1\mu\text{m}$ 以下のパターンを第2面に結像させるために極めて好適であるという効果がある。

また、本発明の第1の観点による投影光学系によれば、第1面での軸上光束を前方光学系によってほぼ平行光束にして第1の回折光学素子へ入射させ、更に第1の回折光学素子を介した第1面での軸上光束を再びほぼ平行光束に変換して第2の回折光学素子へ導くようにしているので、第1面の像を第2面に高い精度で結像させることができる。また、第1の回折光学系及び第2の回折光学素子は、前方光学系及び後方光学系並びに負のパワーを有する光学系によって生ずる色収差と逆の特性の色収差特性を有しており、更にペッツバールの条件に影響を与えないため良好に色収差を補正することができるため、第1面の像を第2面に高い精度で結像させる上で極めて好適である。また、色収差の補正は回折光学素子のみで行っており、色収差を補正するためだけに光路に配置される数枚のレンズを不要としてコストの上昇を抑えることができる。更に、レンズの硝材の制約から色収差をレンズでは補正することができない場合であっても、収差特性がレンズとは逆である回折光学素子を用いることによって色収差の補正を行うことができる。更に、第1の回折光学素子及び第2の回折光学素子の2つの回折光学素子を用いることで色収差の補正に必要となるパワーを各々の回折光学素子によって得ているため、前方光学系及び後方光学系並びに負のパワーを有する光学系の設計の結果、これらによって生ずる色収差の値が様々であっても適宜補正することができるという効果がある。

本発明の第2の観点による投影光学系によれば、大きな開口数を有し、且つ角度特性による結像性能劣化がない投影光学系を実現することができ、十分な色収差補正を実現させることができるという効果がある。また、上記の条件を満足す

ることで、回折光学素子のピッチが極めて微細化されることはなく、比較的広いピッチを有し、製造の容易な回折光学素子を用いることができるという効果がある。

本発明の第3の観点による投影光学系によれば、回折パターン面の製造誤差を補正する補正面を回折光学素子に形成しているので、極めて高い精度の結像特性が要求される投影光学系に用いられる回折格子としては極めて好適であるという効果がある。

本発明の第4の観点による投影光学系によれば、光学素子に形成された光学面の製造誤差を補正面によって補正するようにしているので、極めて高い精度の結像特性が要求される投影光学系に用いられる光学素子としては極めて好適である。という効果がある。

本発明の露光装置によれば、第1面に配置されたマスクに形成されたパターンの像を第2面に配置された感光性基板上に精度良く結像することができるので、ウェハ上に微細なパターン、特に $0.1\mu\text{m}$ 以下の微細パターンを形成するのに極めて好適であるという効果がある。

本発明のマイクロデバイスの製造方法によれば、上記露光装置と同様に、第1面に配置されたマスクに形成されたパターンの像を第2面に配置された感光性基板上に精度良く結像することができるので、微細なパターン、特に $0.1\mu\text{m}$ 以下の微細パターンを形成する必要があるマイクロデバイスを製造するのに極めて好適であるという効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の一実施形態による投影光学系を備えた本発明の一実施形態による露光装置の概略構成を示す図である。

【図2】 本発明の一実施形態による投影光学系PLの光学的構成の基本構成を示すレンズ断面図である。

【図3】 回折光学素子D1、D2の第1構成例を概略を示す図であって、(a)は斜視図であり、(b)は断面図である。

【図4】 バイナリオプティクス素子の形成方法の一例を示す断面図である。

【図 5】 回折光学素子 D 1, D 2 の第 2 構成例を概略を示す図であって、
(a) は斜視図であり、(b) は断面図である。

【図 6】 投影光学系 P L を介した照明光がウェハ W 上に照射される様子を
示す図である。

【図 7】 本発明の一実施形態による投影光学系 P L の第 1 実施例の光学的
構成を示すレンズ断面図である。

【図 8】 本発明の一実施形態による投影光学系 P L の第 1 実施例の子牛方
向 (タンジェンシャル方向) 及び球欠方向 (サジタル方向) における横収差図 (コ
マ収差図) を示す図である。

【図 9】 本発明の一実施形態による投影光学系 P L の第 2 実施例の光学的
構成を示すレンズ断面図である。

【図 1 0】 本発明の一実施形態による投影光学系 P L の第 2 実施例の子牛
方向 (タンジェンシャル方向) 及び球欠方向 (サジタル方向) における横収差図
(コマ収差図) を示す図である。

【図 1 1】 マイクロデバイスの製造例を示すフローチャートである。

【図 1 2】 半導体デバイスの場合における、図 1 1 のステップ S 1 3 の詳
細なフローの一例を示す図である。

【符号の説明】

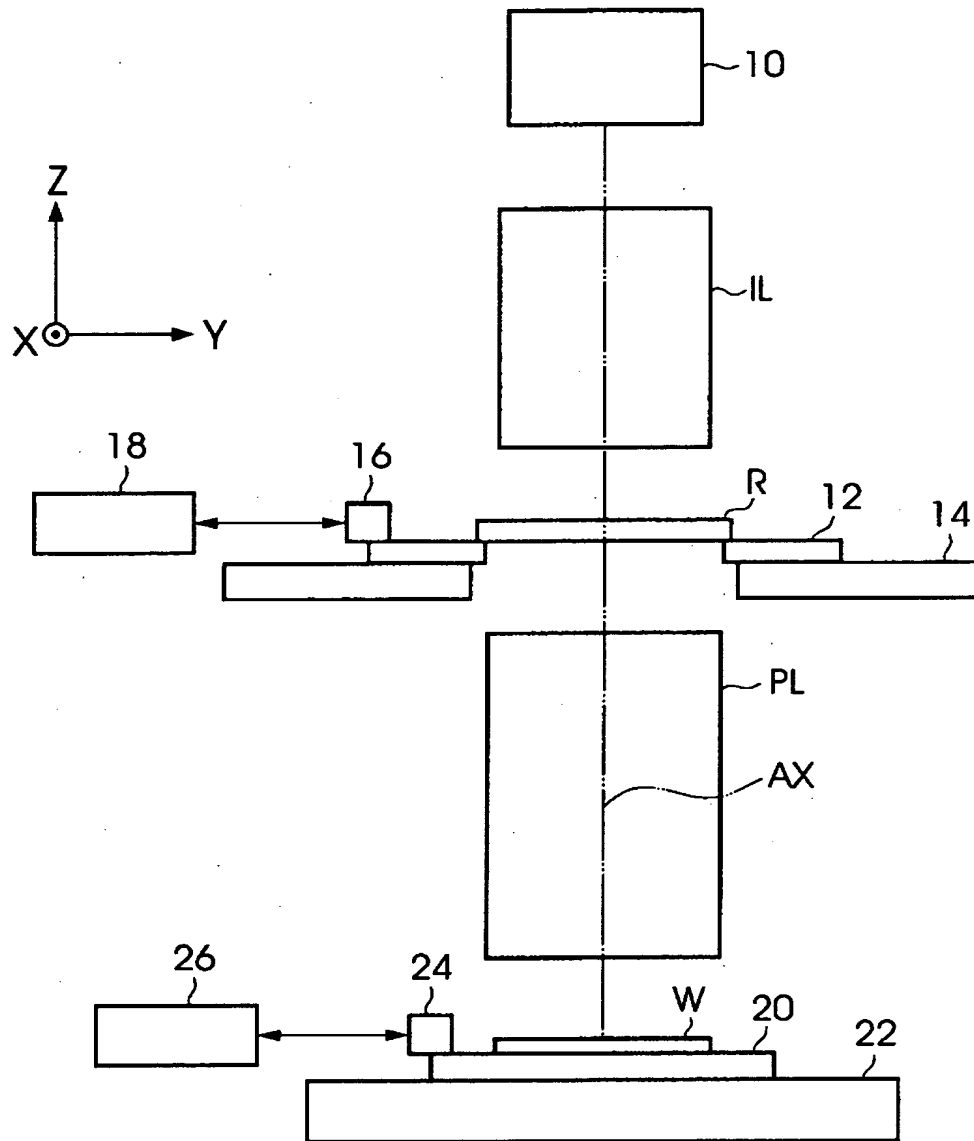
1 0	光源 (照明光学系)
1 4	レチクルステージ (マスクステージ)
2 2	ウェハステージ (基板ステージ)
R	レチクル (マスク)
W	ウェハ (感光性基板)
A X	光軸
I L	照明光学系 (照明光学系)
P 1	第 1 面
P 2	第 2 面
P L	投影光学系
D 1	回折光学素子 (第 1 の回折光学素子)

D 2	回折光学素子（第 2 の回折光学素子）
G 1	光学系（前方光学系）
G 2	光学系（負のパワーを有する光学系）
G 3	光学系（後方光学系）
P L 1, P L 1 1	回折パターン面
P L 2, P L 1 2	補正面

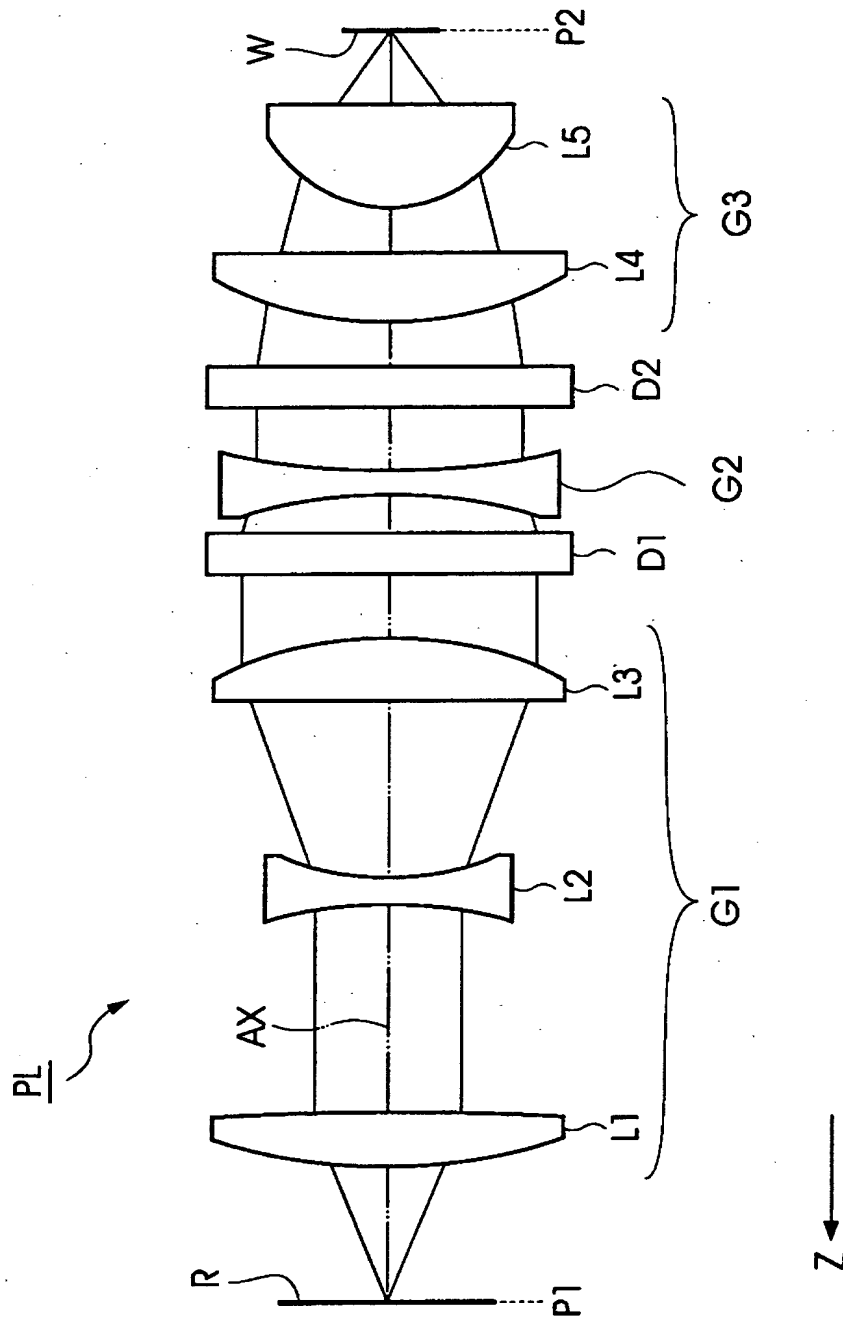
【書類名】

図面

【図 1】

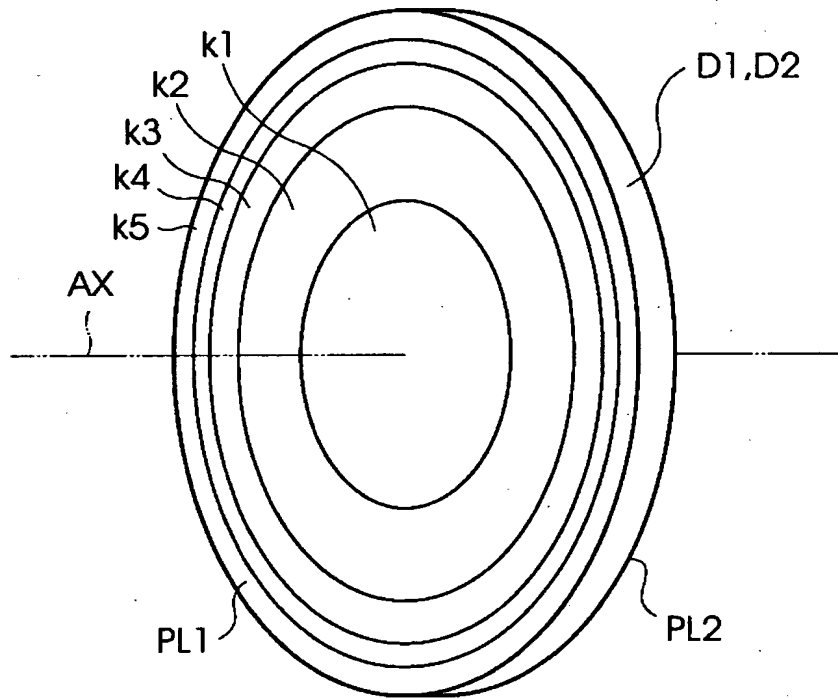


【図2】

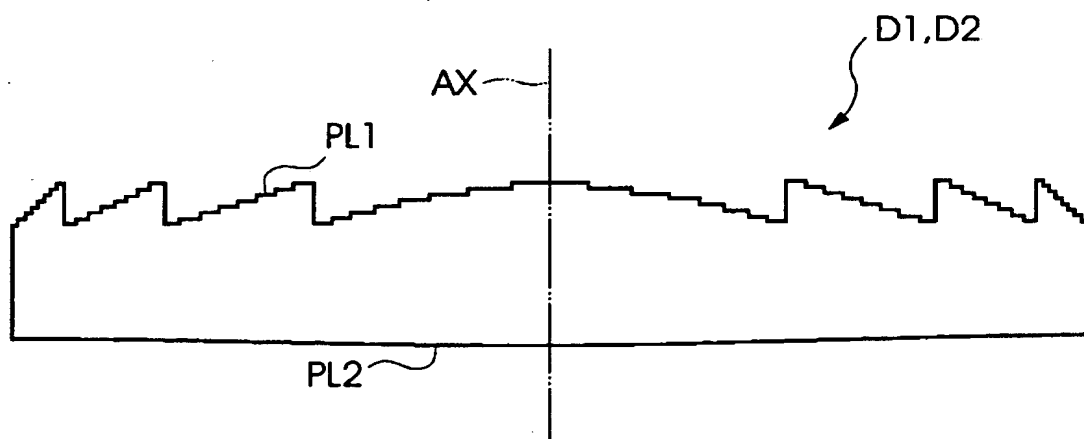


【図 3】

(a)

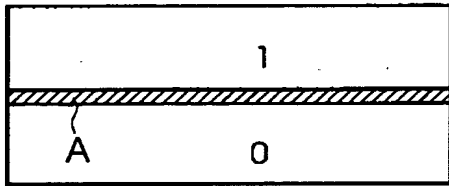


(b)

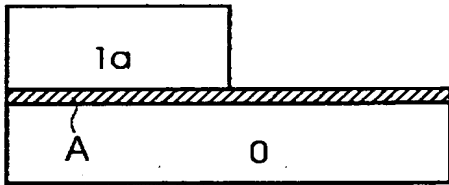


【図4】

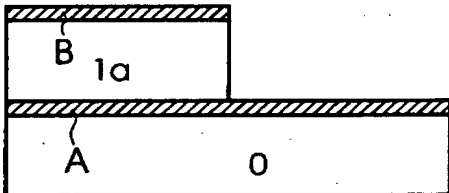
(a)



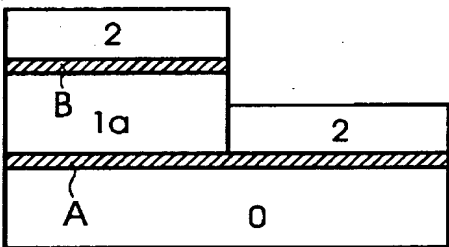
(b)



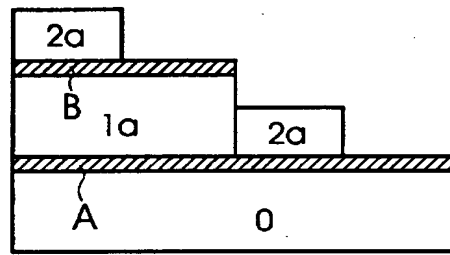
(c)



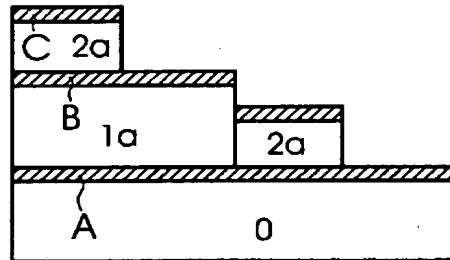
(d)



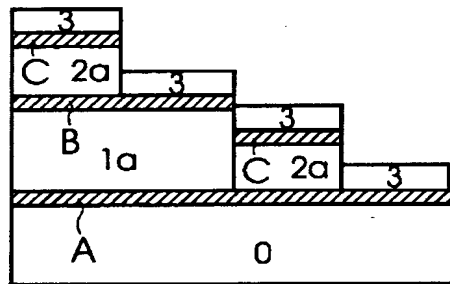
(e)



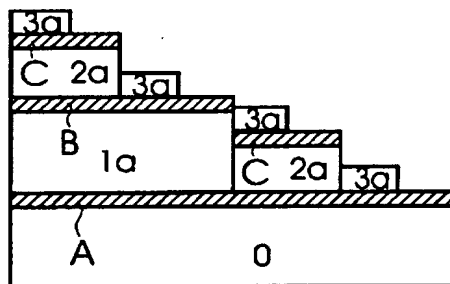
(f)



(g)

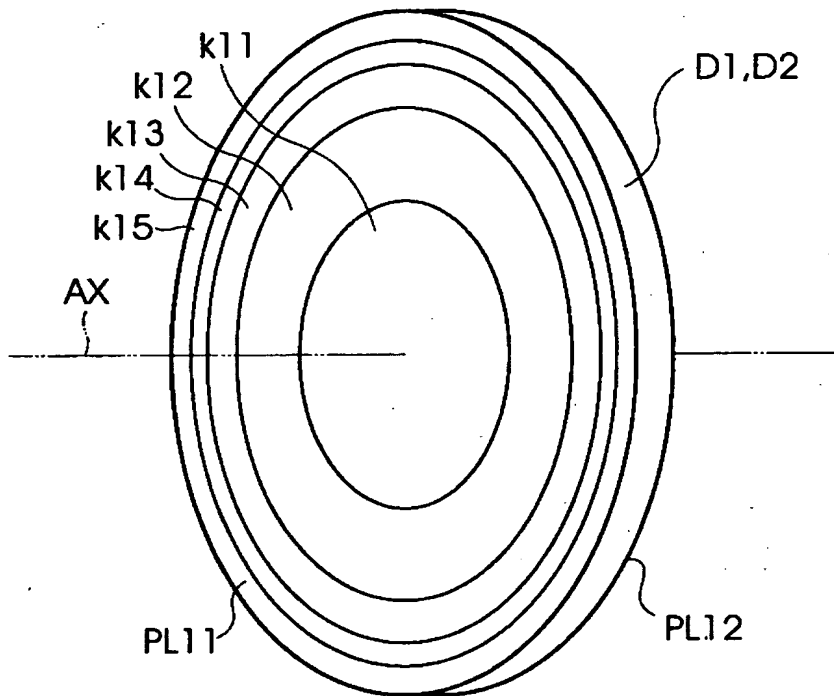


(h)

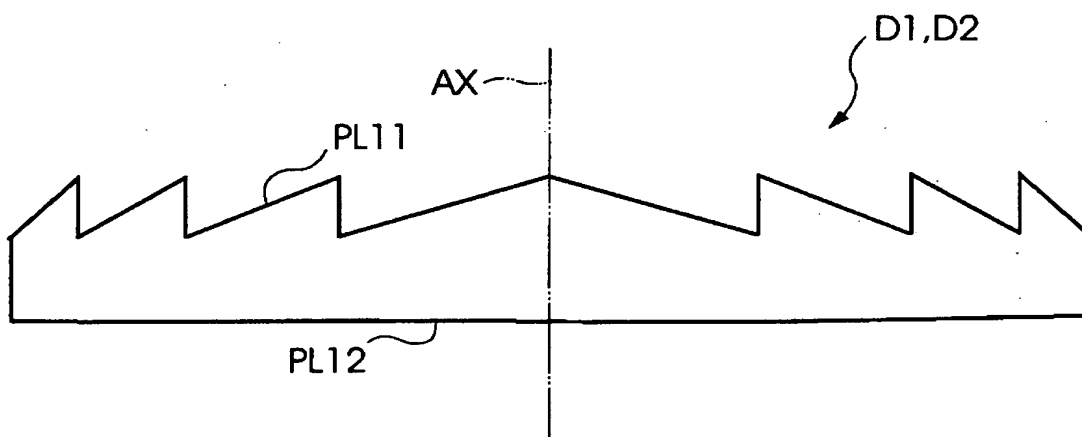


【図5】

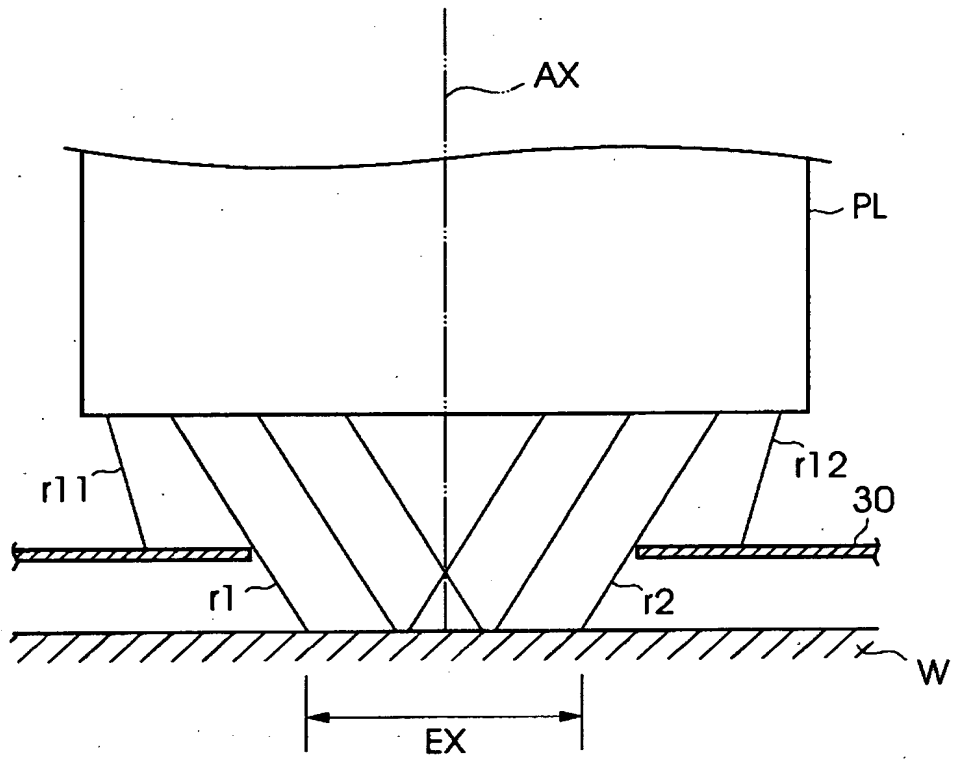
(a)



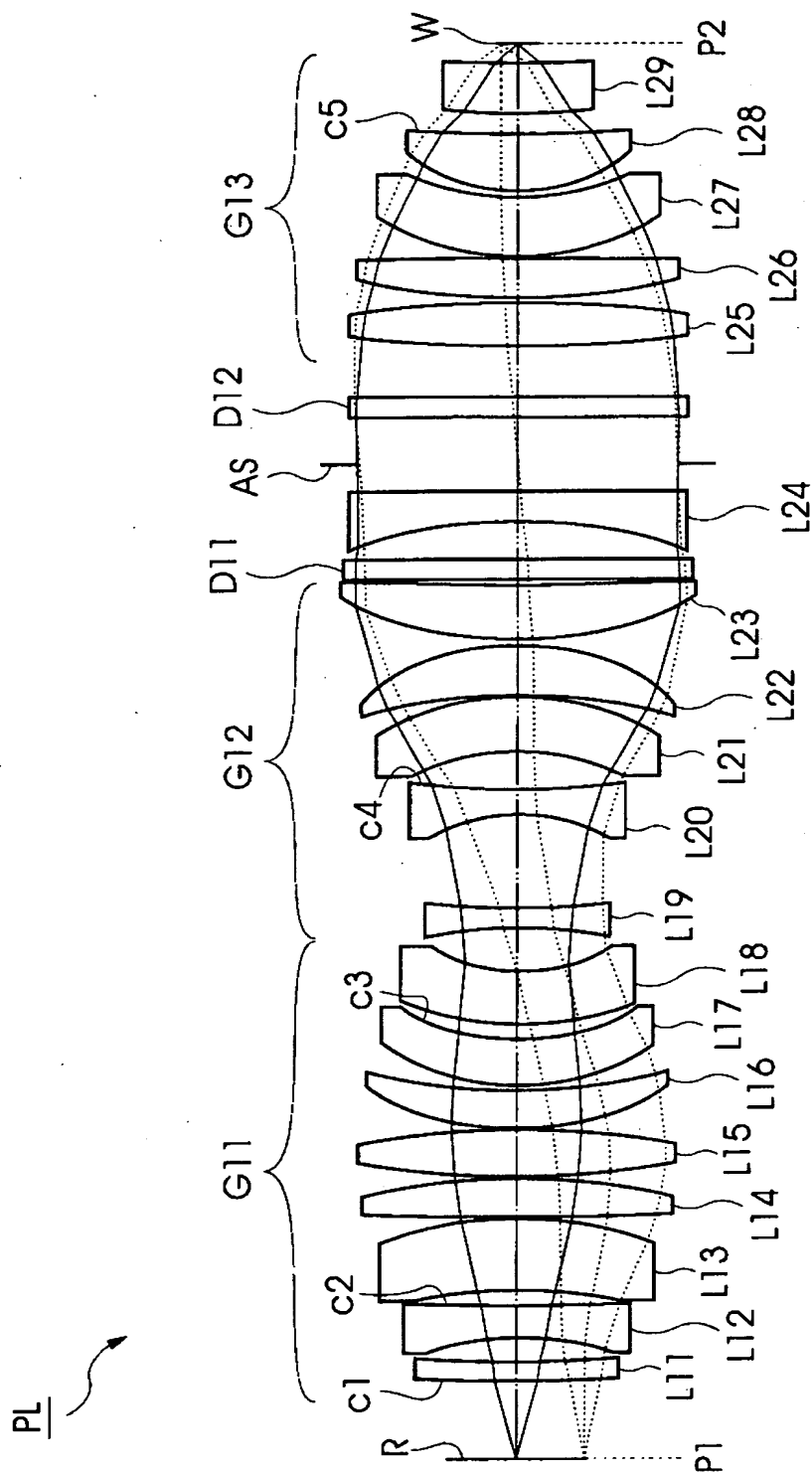
(b)



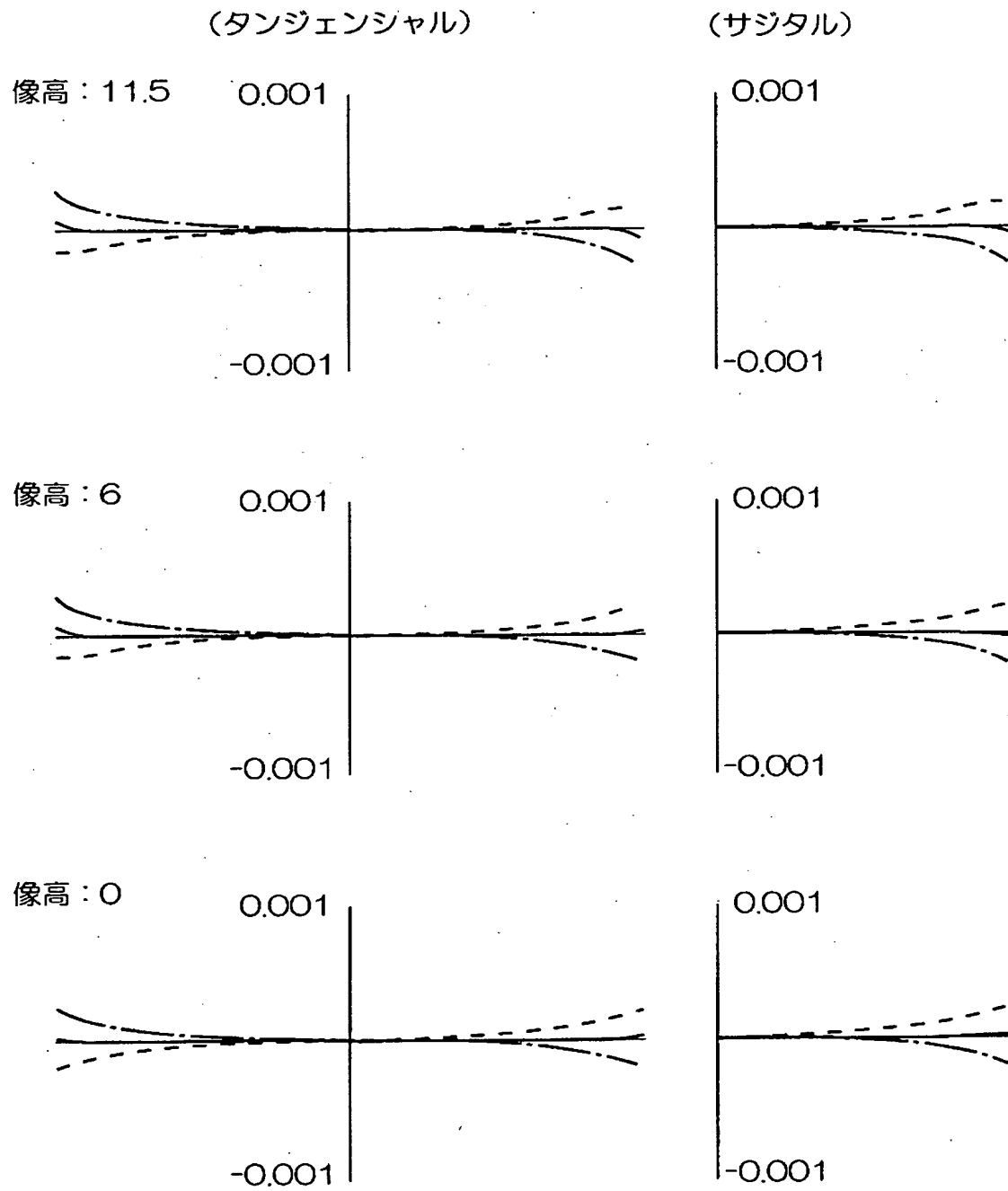
【図 6】



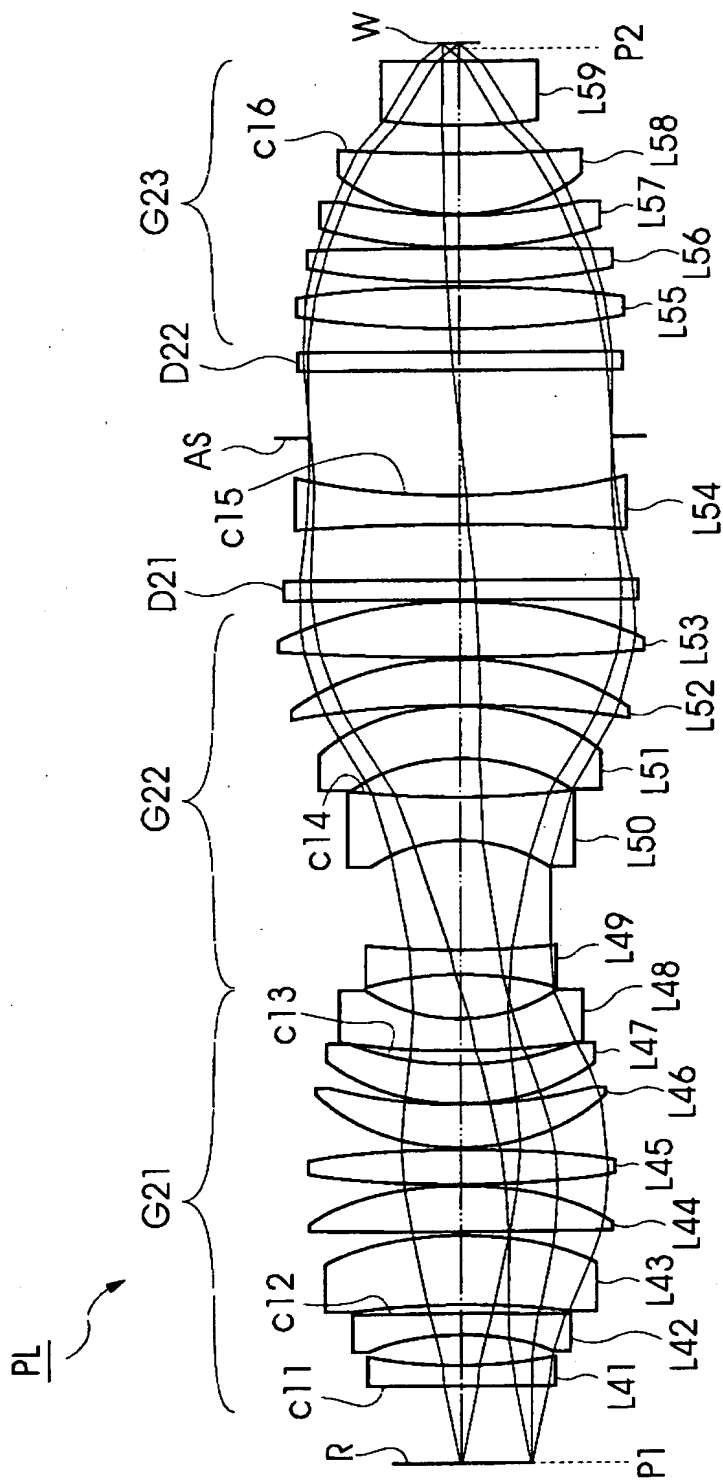
【図 7】



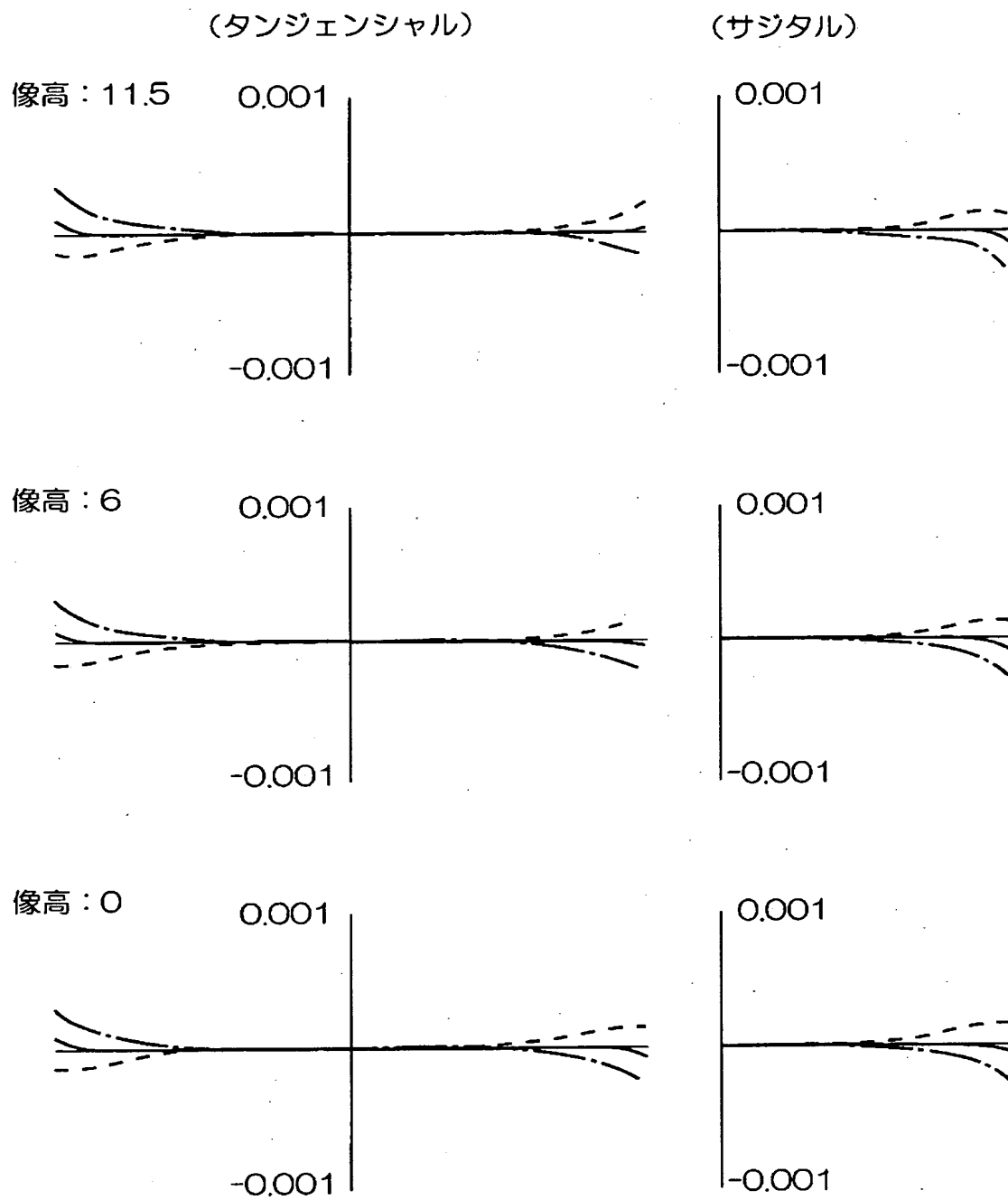
【図 8】



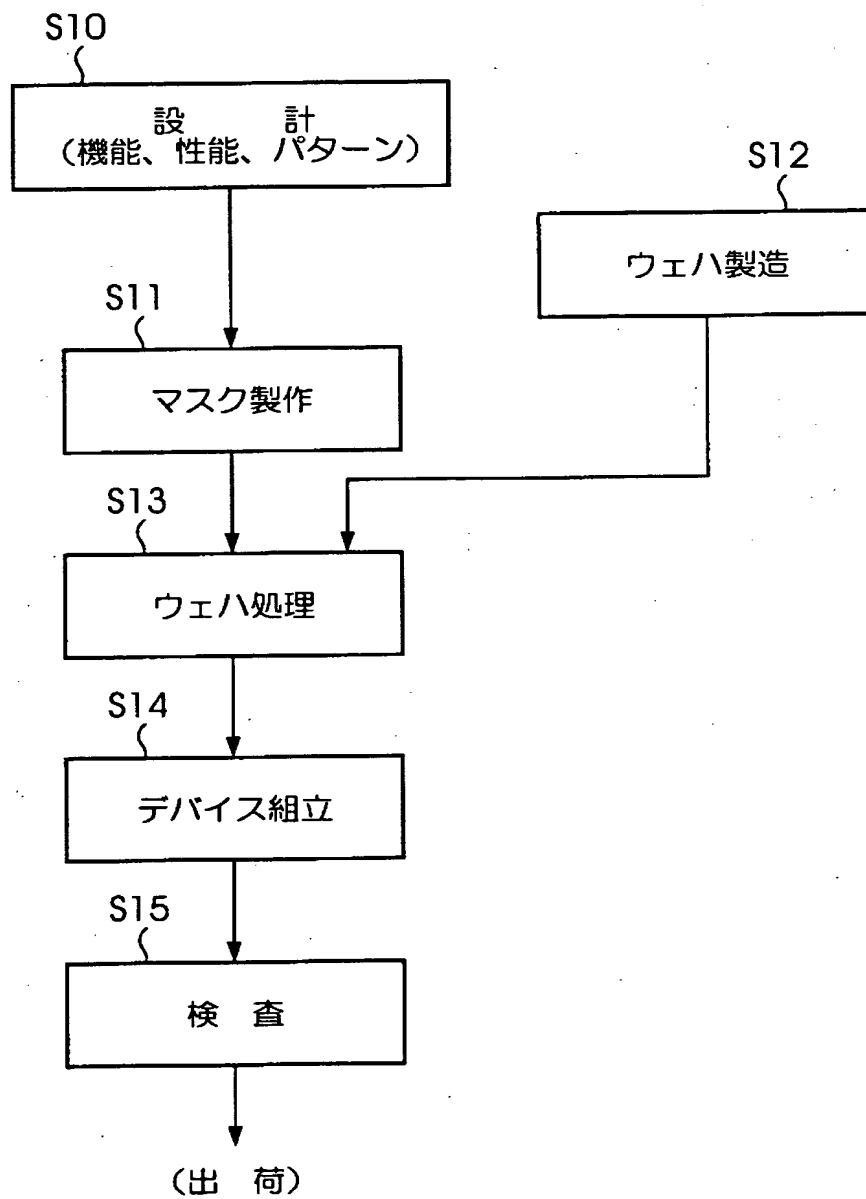
【図 9】



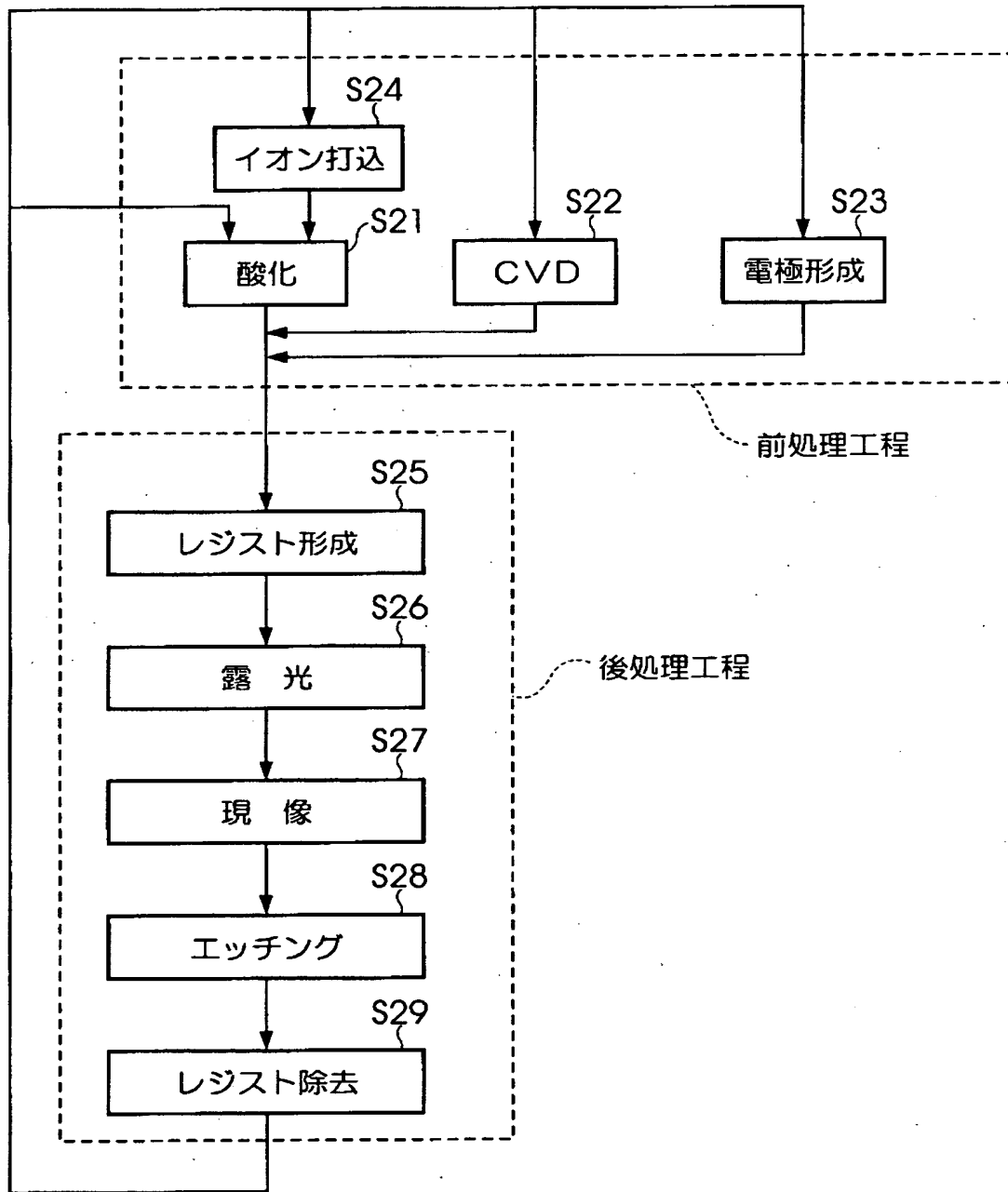
【図 10】



【図 11】



【図12】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 極紫外の照明光を用いて第 1 面の像を第 2 面に好適な条件で結像することができる投影光学系を提供する。

【解決手段】 第 1 面 P 1 の像を第 2 面 P 2 に結像する投影光学系において、第 1 面 P 1 と第 2 面 P 2 との間の光路に配置された第 1 の回折光学素子 D 1 と、第 1 の回折光学素子 D 1 よりも第 2 面 P 2 側の光路に配置された第 2 の回折光学素子 D 2 と、第 1 の回折光学素子 P 1 と第 2 の回折光学素子 P 2 との間の光路に配置された負のパワーを有する光学系 G 2 とを具備することを特徴としている。

【選択図】 図 2

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[000004112]

1. 変更年月日 1990年 8月29日

[変更理由] 新規登録

住 所 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

氏 名 株式会社ニコン